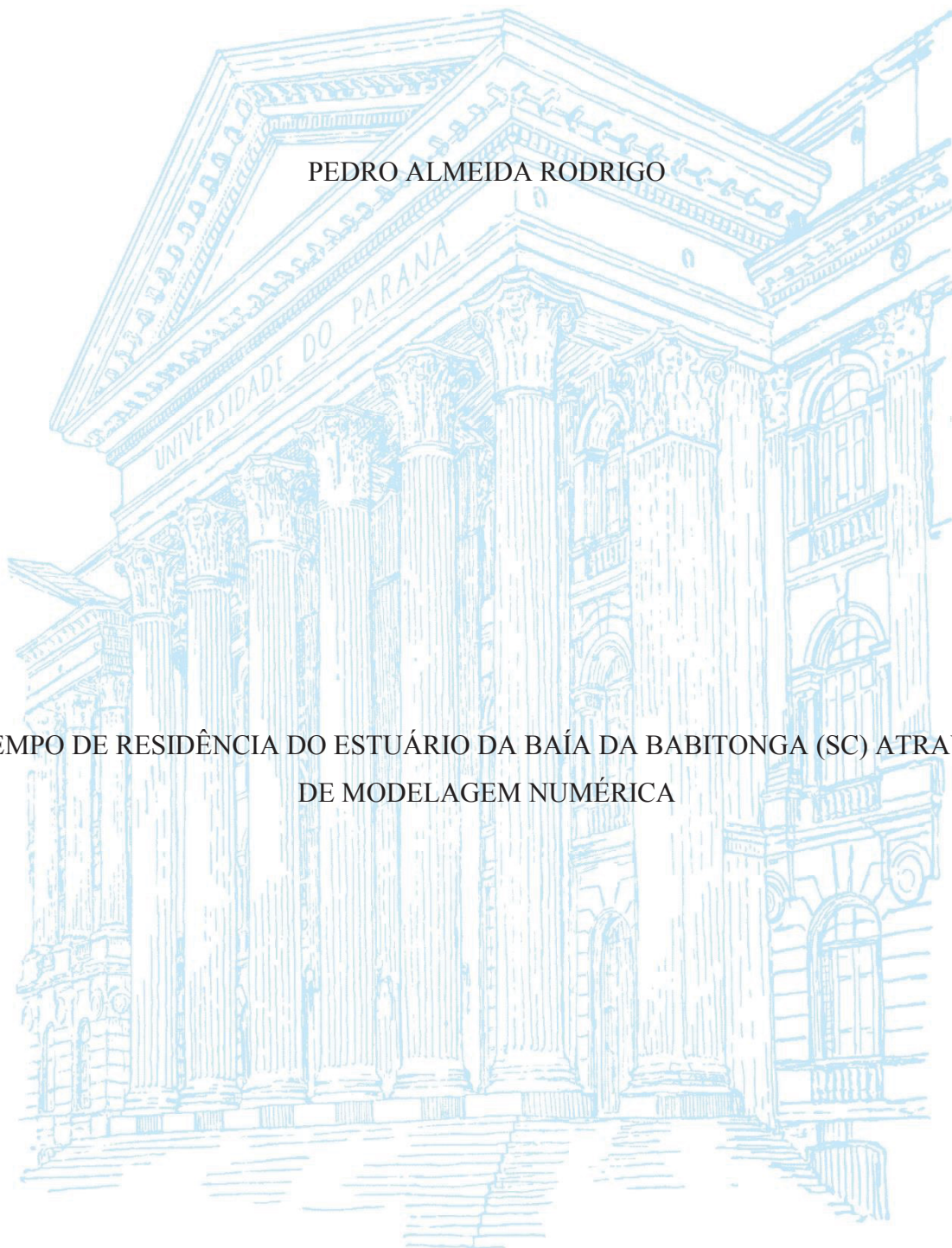


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

PEDRO ALMEIDA RODRIGO

TEMPO DE RESIDÊNCIA DO ESTUÁRIO DA BAÍA DA BABITONGA (SC) ATRAVÉS  
DE MODELAGEM NUMÉRICA



PONTAL DO PARANÁ

2020

PEDRO ALMEIDA RODRIGO

TEMPO DE RESIDÊNCIA DO ESTUÁRIO DA BAÍA DA BABITONGA (SC) ATRAVÉS  
DE MODELAGEM NUMÉRICA

Dissertação apresentada como requisito parcial à  
obtenção do grau de mestre em Sistemas Costeiros e  
Oceânicos no curso de pós-graduação em Sistemas  
Costeiros e Oceânicos, Setor de Ciências da Terra,  
da Universidade Federal do Paraná. Orientador:  
Prof. Dr. Mauricio Almeida Noernberg

PONTAL DO PARANÁ

2020

CATALOGAÇÃO NA FONTE:  
UFPR / SiBi - Biblioteca do Centro de Estudos do Mar  
Fernanda Pigozzi – CRB 9/1151

R618t Rodrigo, Pedro Almeida  
Tempo de residência do estuário da Baía da Babitonga (SC) através de modelagem  
numérica. / Pedro Almeida Rodrigo. – Pontal do Paraná, 2020.  
43 f.: il.; 29 cm.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Almeida Noernberg.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e  
Oceânicos, Campus Pontal do Paraná, Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal  
do Paraná.

1. Modelagem numérica. 2. Modelo hidrodinâmico. 3. Estuário subtropical. I. Título. II.  
Noernberg, Maurício Almeida. III. Universidade Federal do Paraná.

CDD 551

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em SISTEMAS COSTEIROS E OCEÂNICOS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **PEDRO ALMEIDA RODRIGO** intitulada: **Tempo de residência do estuário da Baía da Babitonga através de modelagem numérica.**, sob orientação do Prof. Dr. MAURICIO ALMEIDA NOERNBERG, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Pontal do Paraná, 27 de Março de 2020.

Assinatura Eletrônica

07/04/2020 09:18:35.0

MAURICIO ALMEIDA NOERNBERG

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

07/04/2020 11:05:26.0

TOBIAS BERNWARD BLENINGER

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

07/04/2020 16:20:05.0

MARCOS EDUARDO CORDEIRO BERNARDES

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL DA BAHIA)

## AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pela bolsa de mestrado e pelo apoio financeiro do projeto de pesquisa “Desenvolvimento de modelagem oceânica com foco na geração de cenários futuros de mudanças climáticas globais, utilizando o modelo climático global BESM, na plataforma continental e zona costeira do Brasil (ModCosta – Proc: 88887.145863/2017-00)”, do programa CAPES MODELAGEM - Desenvolvimento de Modelagem do Sistema Terrestre. Em especial ao meu orientador Prof. Dr. Mauricio Noernberg, por toda ajuda, paciência e inspiração, sem as quais não teria sido possível realizar este trabalho. Ao Dr. Guilherme Franz, pelo suporte na modelagem numérica. Aos meus companheiros do LOCG: David, Nicole, Lucas e Bryan, pela ajuda e apoio durante esta etapa. A todos colegas da pós-graduação, pelo companheirismo neste desafio. Aos professores e funcionários do CEM, que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho e desenvolvimento pessoal. A PGSISCO, pelo suporte logístico e estrutural. A EPAGRI e Joiville Iate Clube, pelos dados meteoceanográficos cedidos. À MarBrasil, pelo empréstimo dos equipamentos de mergulho. A todos que participaram e contribuíram para a campanha de coleta de dados. Também gostaria de agradecer aos colegas da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) pelo empréstimo de um CTD e pelo apoio durante as campanhas de coleta dos dados. Para que esta conquista fosse alcançada, o apoio incondicional da minha mãe Leane e do meu pai Juan, que sempre me incentivaram a mergulhar nas minhas paixões e pelo apoio da Andi, que me inspira, como uma musa.

## RESUMO

Uma maneira de qualificar e quantificar a condição de um sistema estuarino e sua capacidade de se renovar, é através do tempo de residência (TR). A compreensão dos processos hidrodinâmicos locais pode servir como ferramenta para se compreender processos biogeoquímicos, assim como suas escalas e variabilidade temporal. Em um estuário, as taxas de renovação da água e o tempo de residência são produtos de um sistema dinâmico, regido principalmente pela maré e descarga fluvial, que caracterizam os gradientes de pressão que dominam a hidrodinâmica local. O estuário da Baía da Babitonga está localizado no litoral norte de Santa Catarina, Brasil, seus padrões de circulação e tempo de residência são pouco conhecidos. Ele está margeado pelo município industrial de Joinville e os municípios portuários de Itapoá e São Francisco do Sul. Essa pressão antrópica precisa ser monitorada, visando uma abordagem sustentável deste ecossistema. A proposta deste trabalho é caracterizar a hidrodinâmica através da modelagem numérica 2D, utilizando o modelo hidrodinâmico MOHID, e avaliar as variações sazonais do tempo de residência do estuário. Para estimar o tempo de residência, o módulo lagrangeano do MOHID é aplicado nos resultados hidrodinâmicos, permitindo mensurar a trajetória e o tempo necessário para as partículas saírem do sistema. O padrão de circulação do estuário da Baía da Babitonga é regido pelos gradientes barotrópicos, predominantemente pela maré, de acordo com resultados gerados a partir das campanhas de coleta *in situ*, assim com da validação dos resultados do modelo 2DH. Os resultados do tempo de residência a partir do módulo lagrangeano para o estuário como um todo foi de 28 dias no verão e 25 dias durante o inverno de 2019. Também foram gerados resultados em seis setores dentro do estuário, sendo que o tempo de residência não ultrapassou o período de 12 dias em nenhum deles. Os resultados do tempo de residência, assim como a capacidade do estuário de se renovar, qualificam e quantificam a situação do estuário, podendo ser utilizado como suporte para situações emergenciais da região ou até mesmo de fomento para estudos que utilizem o tempo de residência como referência.

Palavras-chave: Taxas de renovação, modelo hidrodinâmico, estuário sub-tropical.

## ABSTRACT

One way to qualify and quantify the condition of an estuarine system and its capacity to renew itself is through the residence time (RT), the understanding of local processes can serve as a tool to understand biogeochemical processes, as well as their scales and temporal variability. In an estuary, water renewal rates and residence times are products of a dynamic system, mainly governed by the tide and fluvial discharge, characterizing the pressure gradients that dominate local hydrodynamics. The Babitonga Bay estuary is located on the northern coast of Santa Catarina, Brazil. The behavior of circulation and residence time in the estuary as a whole is poorly understood. It houses the industrial municipality of Joinville and the port municipalities Itapoá and São Francisco do Sul. This anthropic pressure needs to be monitored, aiming at a sustainable and productive approach to this ecosystem. The purpose of this work is to characterize the hydrodynamics through numerical modeling and to evaluate seasonal variations in the estuary residence time. The hydrodynamic model adopted was MOHID, which allows the generation of barotropic (2DH) and baroclinic (3D) simulations. The residence time was estimated using the MOHID Lagrangian module, allowing to measure the trajectory and the time necessary for the particles to leave the system. The circulation pattern of the Babitonga Bay estuary is governed by the barotropic gradients, predominantly by the tide, an argument according to results generated from the in situ collection campaigns, as well as the validation of the results of the 2DH model. The residence time results from the Lagrangian module for the estuary as a whole were 28 days in the summer and 24.97 days during the winter of 2019. Results were also generated in six sectors within the estuary, with the residence time did not exceed 12 days in any of them. The results of the residence time, as well as the estuary's capacity to renew itself, qualify and quantify the situation of the estuary, and can be used as a support for emergencies in the region or even to encourage studies that use the residence time as a reference.

Key-words: Residence time, hydrodynamic model, Baía da Babitonga

1	INTRODUÇÃO.....	6
1.2	HIPÓTESES.....	7
2	OBJETIVOS.....	8
2.1	OBJETIVO GERAL.....	8
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	8
3	ÁREA DE ESTUDO .....	8
4	MÉTODOS.....	13
4.1	Dados meteorológicos e hidrográficos .....	13
4.2	MODELO HIDRODINÂMICO .....	15
4.3	MÓDULO LAGRANGEANO .....	18
5	RESULTADOS .....	20
5.1	CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA.....	20
5.2	MODELO HIDRODINÂMICO .....	24
5.3	TEMPO DE RESIDÊNCIA.....	28
6	DISCUSSÃO.....	30
7	CONCLUSÃO.....	33
	REFERÊNCIAS .....	35



**Residence time of Babitonga Bay (SC) – Brazil**

Tempo de residência da Baía da Babitonga (SC) – Brasil

\* Pedro Almeida Rodrigo <sup>1</sup>, Mauricio A. Noernberg <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos (PGSISCO), Universidade Federal do Paraná, Caixa Postal 61, 83255-976, Pontal do Paraná, PR, Brazil.

<sup>2</sup> Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná, Caixa Postal 61, 83255-976, Pontal do Paraná, PR, Brazil.

**Contato:**

E-mail: [pedrorodrigo@live.com](mailto:pedrorodrigo@live.com)

Revista pretendida: Brazilian Journal of Oceanography, ISSN (1679-8759), Fator de Impacto (JCR, 2018) = 0.926, Qualis CAPES = Estrato B3.

## 1 INTRODUÇÃO

Zonas estuarinas são áreas de importância estratégica, econômica e ecológica por suas características morfológicas e hidrodinâmicas. O estuário da Baía da Babitonga, o maior ambiente estuarino do estado de Santa Catarina, banha as cidades de Joinville, Itapoá e São Francisco do Sul. Cercado por 80% dos manguezais catarinenses (LACERDA et al., 1999), importantes remanescentes de Mata Atlântica, recebe as contribuições dos rios Cachoeira e Cubatão, principais contribuintes para descarga fluvial, fator determinante na hidrodinâmica estuarina, associados às forçantes das marés e às características morfo-sedimentares do corpo aquoso. A intensidade do vento e as variações do nível do mar também exercem influência no regime estuarino (MACCREADY & GEYER, 2010). Além disso, as diferentes densidades das massas d'água oceânica e da descarga fluvial produzem a estratificação da coluna d'água e quando influenciadas pelas forçantes das marés, geram circulação com gradientes de pressão dos tipos barotrópico e baroclínico dentro do estuário (KJERFVE, 1989). As variabilidades sazonais em estuários subtropicais associadas a essas forçantes, podem ser fatores de alteração dos padrões de circulação hidrodinâmica.

Variações do nível do mar geradas pelas mudanças sazonais e eventos de frente fria (SELUCHI, 2017), são fatores que podem configurar mudanças nos padrões hidrodinâmicos, transporte sedimentar, ciclos geoquímicos e nos padrões de produtividade biológica do estuário (GILLANDERS, 2011). A hidrodinâmica controla a distribuição de sedimentos e materiais suspensos ao longo do estuário, desenhando contornos morfológicos, como feições de canais, terraços arenosos, aluviões, padrões de distribuição do substrato, que acompanham as variações sazonais e se reconfiguram com as respectivas variações dos padrões hidrodinâmicos (MIRANDA et al., 2002).

Através do tempo de residência da água, que é a média de tempo que uma partícula de água percorre dentro de um sistema, é possível reconhecer as zonas dentro do estuário onde ocorrem as maiores e menores taxas de renovação dos volumes de água, mensurar concentrações e distribuições de nutrientes, sedimentos, as trocas entre a coluna d'água e o substrato, material particulado em suspensão (MPS) e contaminantes (LE HIR et al., 2000). Este conceito é importante ao avaliar a qualidade da água e as implicações antropogênicas deletérias sobre o corpo aquoso (KENOV, 2012).

Para a quantificação e qualificação de padrões hidrodinâmicos em estuários, deve-se mensurar os principais elementos que configuram cada sistema específico. Uma forma de tratar

estes padrões é através da modelagem numérica. Modelos calibrados e validados são ferramentas indispensáveis ao gerenciamento de sistemas ambientais, permitindo otimizar os custos de medições e monitoramento (HU et al., 2009).

O tempo de residência (TR) no ambiente estuarino é usado para estimar o tempo médio em que o material dissolvido e particulado fica retido no estuário antes de ser transportado para o oceano adjacente (GÓMEZ-GESTEIRA et al., 2003), sendo um parâmetro representativo da escala de tempo de processos físicos de transporte, que pode servir de comparação para processos biogeoquímicos. O TR, assim como outras escalas de taxas de renovação podem ser utilizados como parâmetros de classificação de estuários (DYER, 1973; TAKEOKA, 1984). Pela ótica ecológica, ambientes com altas taxas de renovação de água e menores tempos de residência tendem a ter baixas concentrações de poluentes. Entretanto, quanto maior o tempo de residência, maior a capacidade dos organismos assimilarem os nutrientes e promoverem seus ciclos biogeoquímicos (LUCAS et al., 1999) ou de contaminantes, principalmente em regiões com forte pressão antrópica, como a dispersão de hidrocarbonetos dentro do estuário (LE HIR et al., 2000).

A compreensão dos padrões hidrodinâmicos, morfológicos e de tempo de residência da Baía da Babitonga oferecem um conhecimento chave para o planejamento costeiro. Embora existam estudos específicos, como o de transporte de sedimento no canal do Linguado (SANTOS, 2017) e da hidrodinâmica do sub-estuário do rio Cubatão no canal do Palmital (SCHETTINI & CARVALHO, 1999), o comportamento da circulação no conjunto do estuário é pouco conhecida. A inexistência de trabalhos que descrevam a hidrodinâmica do estuário da Baía da Babitonga e seu tempo de residência torna fundamental reconhecer as variações sazonais e os padrões hidrodinâmicos, para uma correta estimativa do seu TR. Este trabalho se propõe a caracterizar os padrões hidrodinâmicos e estimar as variações sazonais do TR. Os resultados do tempo de residência, assim como a capacidade do estuário de se renovar, podem servir como importante ferramenta de manejo e gestão da Baía da Babitonga.

## 1.2 HIPÓTESES

- I - Existe variabilidade sazonal dos fluxos de descarga fluvial no sistema.
- II - O aumento da descarga fluvial afeta o tempo de residência do estuário.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral é determinar as características hidrodinâmicas e o tempo de residência da Baía da Babitonga - SC.

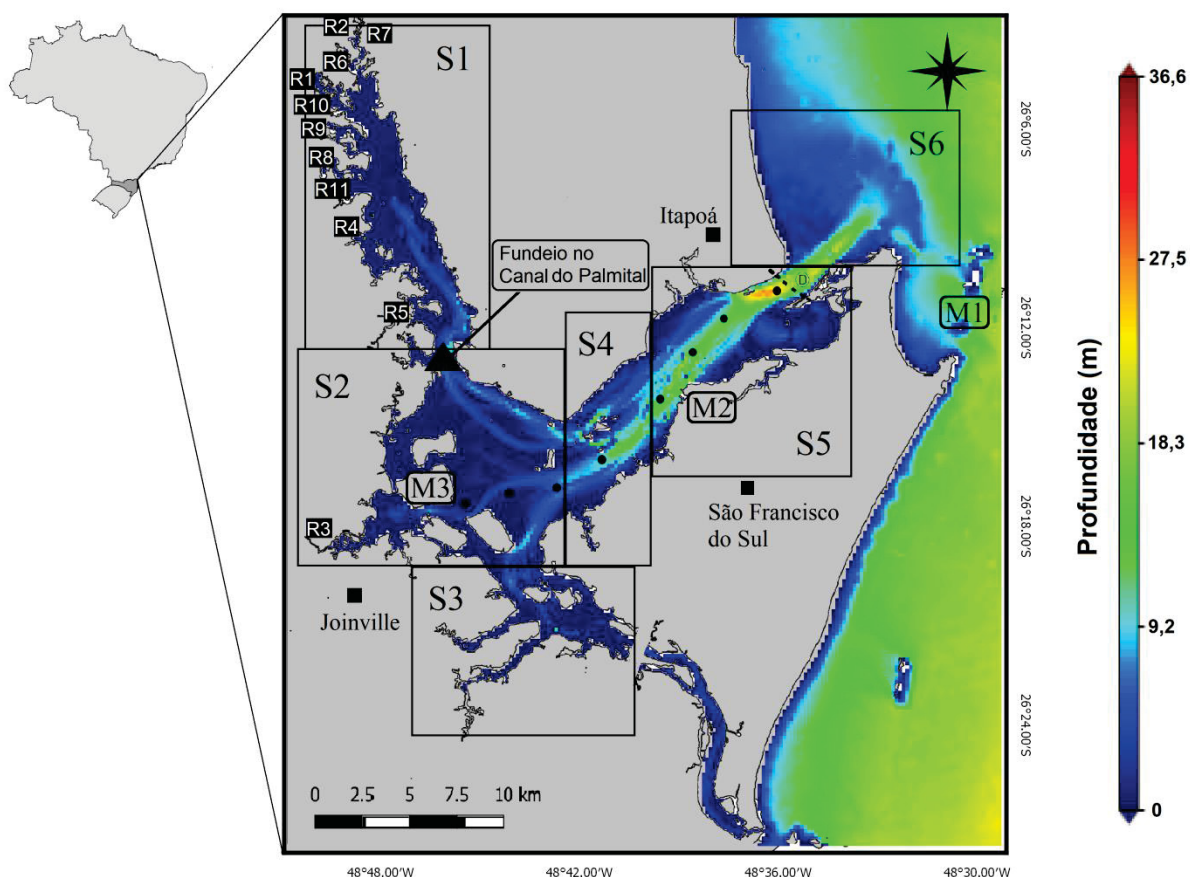
### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar a variabilidade sazonal da descarga fluvial e dos padrões hidrodinâmicos;
- Calibrar e validar um modelo hidrodinâmico com dados coletados *in situ*;
- Estimar a variabilidade sazonal do tempo de residência da água no estuário.

## **3 ÁREA DE ESTUDO**

O estuário da Baía da Babitonga (Figura 1) compreende uma superfície hídrica de aproximadamente 220 km<sup>2</sup>, possuindo atualmente um canal de livre conexão com o oceano, uma vez que a outra saída que existia na porção sul do estuário (Canal do Linguado) foi fechada na década de 1930 para a construção da rodovia BR-280 (ENGEL, 2017). Com essa intervenção, a ilha de São Francisco do Sul se tornou uma península (CRISTOFOLINI et al., 2011).

Figura 1. Estuário da Baía da Babitonga/SC. Os círculos pretos representam 8 pontos de perfilagem com CTD ao longo do estuário, sentido NE/SW. ( - - - ) Transecto na desembocadura do estuário. (▲) Local de fundeio do ADP e CT. Marégrafos na Ilha da Paz (M1), São Francisco do Sul (M2) e Joinville Iate Clube (M3). Os seis setores (Sn) de tempo de residência de interesse. Foz de 11 rios avaliados: R1 – Rio Bonito; R2 – Rio Braço; R3 – Rio Cachoeira; R4 – Rio Canela; R5 – Rio Cubatão; R6 – Rio Cupim; R7 – Rio Onça; R8 – Rio Pirabeiraba; R9 – Rio Sete Voltas; R10 – Rio Três Barras; e R11 – Rio Turvo.



Além das perturbações ambientais anteriormente mencionada, a área de estudos sofre impactos advindos da antropização dos ambientes adjacentes. Atualmente, a intensa urbanização dos municípios que circundam o estuário, a alta concentração de parques fabris dos setores metal-mecânico e a zona portuária que conta com os portos de Itapoá e o porto de São Francisco do Sul, segundo maior porto de carga geral do Brasil, têm propiciado a depreciação, contaminação e a alteração dos corpos aquosos da região (MARTINS, 2014).

O clima na região é do tipo Cfa, segundo a classificação de Köppen-Geiger. A temperatura média anual é de 20,3°C com a média do mês mais frio em torno de 16°C. O clima é caracterizado como super-úmido, de acordo com a classificação de Thornthwaite (GAPLAN, 1986). O litoral norte catarinense recebe a predominância do vento leste durante quase todo o ano; somente no mês de junho, o vento sudeste divide essa predominância segundo Cardoso et

al. (2012; Figura 2 e 3). O regime pluviométrico é caracterizado por chuvas distribuídas ao longo de todo o ano, com média anual em torno de 2.260 mm, apresentando dois máximos, no verão (média 672 mm) e no inverno (média 190 mm) (GONÇALVES et al. 2006).

Figura 2. Direção e intensidade médias do vento (m/s) durante os meses de verão (2014-2019). Fonte dos dados: Estação meteorológica São Francisco do Sul/EPAGRI.

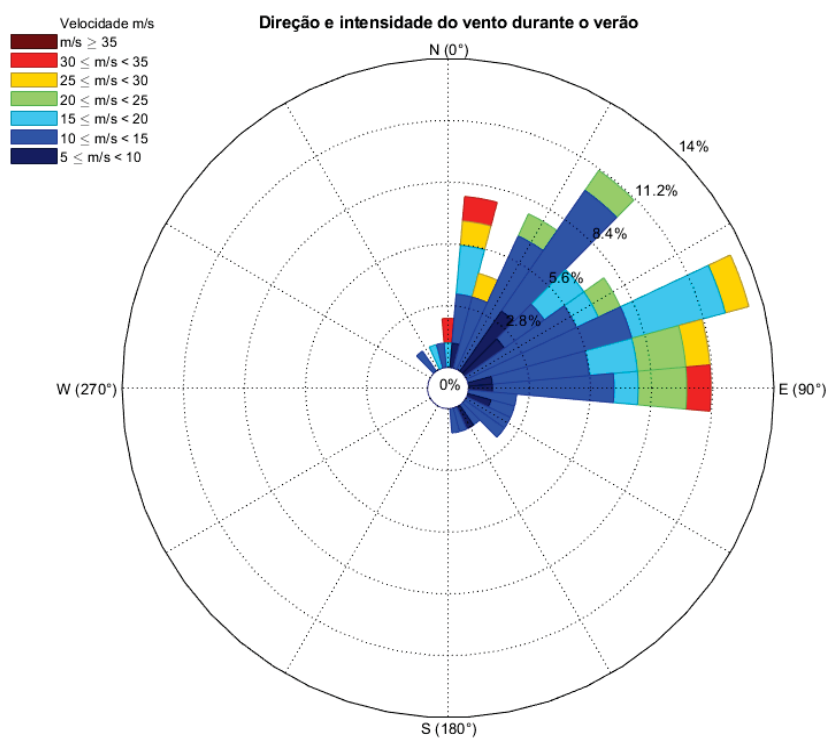
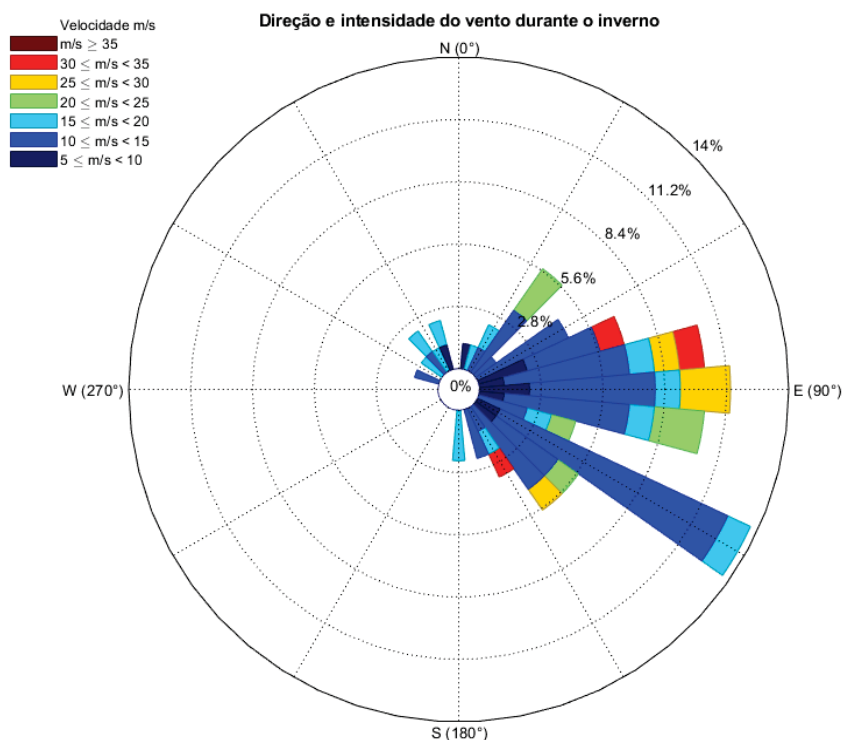
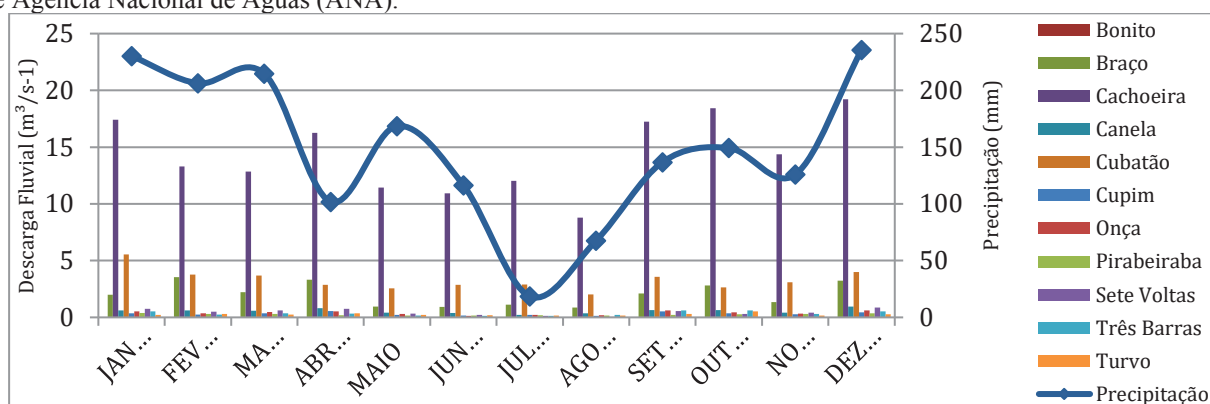


Figura 3. Direção e intensidade médias do vento (m/s) durante os meses de inverno (2014-2019). Fonte dos dados: Estação meteorológica São Francisco do Sul/EPAGRI.



A rede hidrográfica catarinense tem como seu divisor natural a Serra Geral, que forma duas vertentes, a primeira a oeste, compreende sete bacias hidrográficas que integram a bacia Paraná-Uruguai e a segunda vertente incorpora 11 bacias que deságuam diretamente no oceano Atlântico. A área de estudo é alimentada essencialmente pelas bacias de Cubatão e Itapocú. (POTTER, 2010), desenvolvendo subsistemas estuarinos bastante significativos, sendo os principais o Rio Cachoeira, o Rio Cubatão e o Rio Braço (Figura 4). A variação sazonal da descarga de água doce no sistema é dominada pelo regime pluviométrico, similar aos rios da vertente Atlântica de Santa Catarina (SCHETTINI & CARVALHO, 1999), com períodos mais chuvosos durante o verão (dezembro, janeiro e fevereiro) e menos chuvosos durante o inverno (junho, julho e agosto).

Figura 4. Média mensal da precipitação total (mm) entre os períodos de 2014 a 2018 (linha azul) e média mensal da descarga fluvial das 11 estações hidrográficas entre os períodos de 2004 e 2018 (barras verticais). Fonte: EPAGRI e Agência Nacional de Águas (ANA).



A geologia da Baía da Babitonga é constituída por dois grupos distintos de rochas formadas no pré-cambirano, o Complexo Paraíba do Sul (Silva & Bortoluzi, 1987) e o Complexo Luis Alves (Kaul & Teixeira, 1982). Depósitos sedimentares de idade quaternária compõem a planície costeira na região (MAZZER, 2012). A Baía da Babitonga possui uma desembocadura afunilada com 2 km de largura, um canal principal na direção NE/SW, com média de 4 km de largura e profundidades de até 28 m (Figura 1). Outros dois eixos alongados no sentido SE/NW, com largura máxima de 1,5 km e profundidade média de 4 m (Klein, 2017).

O eixo ao norte, denominado Canal do Palmital, recebe as maiores contribuições hidrológicas, oriundas das bacias hidrográficas da escarpa da serra do Mar, formando sistemas complexos como o sub-estuário do rio Cubatão. O Canal do Palmital pode ser caracterizado como um exportador de sedimentos para o interior da baía da Babitonga (SCHETTINI & CARVALHO, 1999). O eixo localizado ao sul, conhecido como Canal do Linguado, apresenta como principal característica a alteração da circulação hidrológica, por ocasião do fechamento do canal na década de 1930, fato que promoveu intensa sedimentação no interior do Canal do Linguado.

A amplitude de variação da maré do estuário se enquadra no regime de micromarés, sendo que as maiores amplitudes médias a montante do Canal do Palmital com 119,72 cm e no canal principal com média de 100,99 cm (IME/DNIT, 2003). Há dominância da maré de enchente com amplificação da altura da maré nas áreas mais interiores do canal (TRUCCOLO & SCHETTINI, 1999), causada principalmente por efeitos de fricção e estreitamento do canal principal.



As principais constituintes harmônicas para o estuário são as frequência semi-diurna M2 e S2, característica desta latitude (VELLOZO, 2004), assim como a presença da quarto-diurna M4, derivada da M2 em regiões de águas rasas, como o estuário da Baía da Babitonga (TRUCCOLO, 2010).

## 4 MÉTODOS

Este trabalho faz parte do projeto “Desenvolvimento de modelagem oceânica com foco na geração de cenários futuros de mudanças climáticas globais, utilizando o modelo climático global BESM, na plataforma continental e zona costeira do Brasil (ModCosta – Proc: 88887.145863/2017-00)”, do programa CAPES MODELAGEM - Desenvolvimento de Modelagem do Sistema Terrestre. A estrutura do trabalho foi composta por três partes: Levantamento de dados pretéritos para os anos de 2014 a 2018 e coleta de dados *in situ* em 2019; implementação do modelo hidrodinâmico MOHID; e a aplicação do módulo lagrangeano para quantificar o TR do estuário.

### 4.1 Dados meteorológicos e hidrográficos

Os dados ambientais pretéritos levantados para configurar e calibrar o modelo hidrodinâmico são apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Dados utilizados para implementar o modelo hidrodinâmico. Localização das estações meteoceanográficas: Estação do Joinville Iate Clube (-26°17'30.6" -48°46'25.9") e as estações da EPAGRI Ilha da Paz (-26°10'35.6" -48°29'08.0") e São Francisco do Sul (-26°14'18.0" -48°38'10.4").

Classe de dado	Período	Frequência amostral	Distribuição espacial (n° de estações)	Fonte
Vento (intensidade e direção)	05/2014 até 08/2018	Horário	2	EPAGRI/CIRAM e Joinville Iate Clube
Precipitação	05/2014 até 08/2018	Total diária	2	EPAGRI/CIRAM e Joinville Iate Clube
Maré	09/2014 até 08/2018	15 minutos	4	EPAGRI/CIRAM e Joinville Iate Clube
Correntes (intensidade e direção)	07/2017 até 08/2018	Média diária	3	EPAGRI/CIRAM
Descarga fluvial	12/2004 até 08/2018	Média mensal	11	Agência Nacional de Águas (ANA)

Batimetria	“Subida do nível do mar e a Baía da Babitonga: uma abordagem eco-morfodinâmica para prever e mitigar impactos.”	Klein, 2017
Sedimentos	“Efeitos da contaminação por metais na macrofauna bêntica de ambientes estuarinos.”	Souza, 2016

As campanhas para obtenção de dados *in situ* foram realizadas no verão e inverno de 2019. O desenho amostral das campanhas foi estruturado:

i) obtenção de séries temporais de dados de velocidade e direção de corrente, altura do nível da água, condutividade e temperatura do fundo no Canal do Palmital, interior do estuário. Um perfilador de correntes (ADP - SonTek® modelo XR) e um sensor de condutividade e temperatura (CT - JFE® modelo ACTW-USB) foram instalados a 0,3 metro acima do fundo e 5 metros de profundidade no Canal do Palmital (26°13'23.3"S 48°45'54.9"W), nas estações de verão (30/01-07/02) e inverno (16/06–24/07), com o auxílio de mergulhadores. O ADP foi configurado em cinco células, com 80 cm cada e um *blanking* também de 80 cm. O CT tem precisão de 0,05 g kg<sup>-1</sup> de salinidade e 0,05°C de temperatura. Os dois equipamentos fizeram medições simultâneas a cada 15 minutos. Os parâmetros medidos foram intensidade e direção de corrente, nível da água, temperatura e salinidade;

ii) transectos longitudinais com oito pontos de perfilagem vertical de temperatura, condutividade e pressão, ao longo de 19 km entre a desembocadura e Joinville. O espaçamento entre os pontos foi de 2.7 km, o percurso levou em média 70 min na preamar e baixamar, durante a sizígia e a quadratura. O equipamento utilizado foi um CTD CastAway® de precisão de 0.1 g kg<sup>-1</sup> na salinidade e 0.05°C na temperatura, e;

iii) seções transversais ao longo de um ciclo de maré semi-diurna (13 horas). Foram realizados em média de 40 transectos com ADP rebocado (SonTek® modelo ADP-SY). O ADP foi configurado com um intervalo de cinco segundos, com 64 células, sendo cada célula de 50 cm e um *blanking* de 70 cm, e conectado a um GPS Garmin® eTrex para geoposicionamento. Os perfis de velocidade foram registrados a cada cinco segundos com uma resolução horizontal de 12,5 m. Simultaneamente, a cada dois transectos, foram realizados cinco perfis equidistantes da coluna d'água (400m), utilizando um CTD (JFE® modelo ASTD 687), com precisão de 0,01 g kg<sup>-1</sup> de salinidade e 0,01°C de temperatura. Foram realizados 20 perfis em cada ponto, durante as quatro campanhas de coleta. Os parâmetros medidos na desembocadura foram intensidade e direção de corrente, profundidade, temperatura e salinidade nas marés de sizígia e quadratura,

do verão e inverno.

## 4.2 MODELO HIDRODINÂMICO

O modelo utilizado foi o modelo hidrodinâmico MOHID 2DH/3D, desenvolvido pela MARETEC, do Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Portugal. O MOHID 2DH barotrópico, considera apenas uma camada vertical, em transformação da coordenada sigma ( $\sigma$ ) ou profundidade adimensional, representada pela resolução das equações de profundidade média. A escolha deste tipo de modelagem foi orientada em função dos padrões barotrópicos de circulação, de acordo com (SCHETTINI & CARVALHO, 1999; SUTHERLAND et al., 2004; BRIÈRE et al., 2007; BERTIN et al., 2009; PINTO et al., 2012). O modelo hidrodinâmico resolve as equações de Navier–Stokes, considerando as aproximações de incompressibilidade, hidrostática, Boussinesq e Reynolds (FRANZ, 2014).

As três equações principais para resolver a circulação hidrodinâmica em um escoamento que devem ser considerados 2DH integrado na vertical ( $\zeta$ ,  $U$ ,  $V$ ), são:

a equação de quantidade de movimento bidimensional na direção  $x$  representada por:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_x^s - \tau_x^b) + 2\phi \sin\theta V; \quad \text{Eq. 1}$$

a equação de quantidade de movimento bidimensional na direção  $y$ :

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{1}{\rho_0 H} \left( \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho_0 H} (\tau_y^s - \tau_y^b) + 2\phi \sin\theta U; \quad \text{Eq. 2}$$

e a equação de continuidade bidimensional:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0; \quad \text{Eq. 3}$$

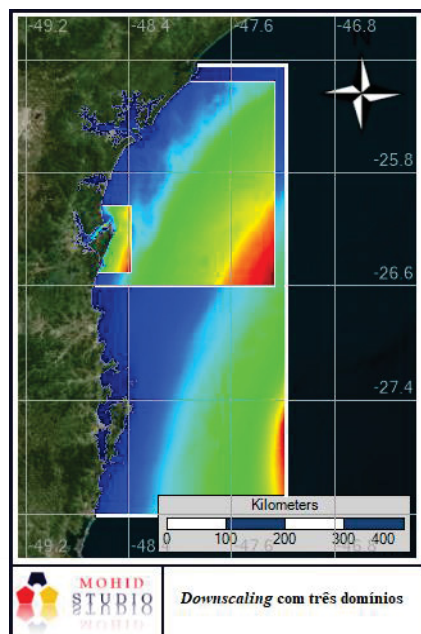
onde  $U$  é a velocidade média na vertical na direção  $x$ ;  $V$  é a velocidade média na vertical na direção  $y$ ;  $g$  é a gravidade;  $\zeta$  é a elevação da superfície livre;  $\rho_0$  é a massa específica de referência;  $H$  é a profundidade instantânea;  $t_{xx}$  é a tensão de atrito horizontal;  $t_{xy}$  é a tensão de

atrito na vertical;  $t_x^s$  é tensão de atrito na superfície livre;  $t_x^b$  é a tensão de atrito no fundo;  $\Phi$  é a velocidade angular da rotação da Terra no sistema de coordenadas local e  $\theta$  é o ângulo de latitude.

A construção da malha retangular foi feita no MOHID para interpolação da batimetria, com maiores resoluções nas áreas de interesse com células de 120 m no interior do estuário e 1 km na área externa ao estuário. O modelo batimétrico da Baía da Babitonga (Figura 1) foi gerado a partir dos dados de batimetria do projeto “Subida do nível do mar e a Baía da Babitonga: uma abordagem eco-morfodinâmica para prever e mitigar impactos” (KLEIN, 2017), entretanto, os dados não cobrem a área toda, sendo necessário interpolar para preencher as lacunas. A interpolação foi gerada pelo MOHID por meio de triangulação. A calibração e a validação da interpolação foi realizada comparando os resultados com as cartas náuticas números 1.804 e 1.805, produzidas pela Marinha do Brasil, ambas na escala de 1:27.000.

O modelo Mohid foi aplicado em *downscaling*, suavizando as condições de contorno impostas à área de estudo (HAYATININGSIH, 2007). A aplicação de *downscaling* do modelo regional para o local foi utilizada também por Mateus et al. (2012), Bricheno et al. (2014), e Franz (2014). O modelo foi aplicado utilizando três domínios: domínio regional da Plataforma Sudeste (1/36°); domínio da região costeira do Paraná e Santa Catarina (600 m), ambos anteriormente desenvolvidos pelo Laboratório de Oceanografia Costeira e Geoprocessamento (LOGC); e o domínio da Baía de Babitonga (120 m), desenvolvido neste trabalho (Figura 5).

Figura 5. *Downscaling* a partir do domínio regional da Plataforma Sudeste com resolução do grid de 3 km; domínio da região costeira do Paraná e Santa Catarina (600 m); e o domínio da Baía de Babitonga (120 m) (Cada domínio com sua respectiva escala).



A área de contorno aberto do domínio local é uma secção retangular em frente à desembocadura do estuário. Os dados de entrada impostos foram: média mensal da descarga fluvial de 11 rios (Figura 4); a maré do modelo global de FES2004 (*Finite Element Solution global tide model*, disponível em: <https://www.aviso.altimetry.fr/>); e médias diárias de salinidade, temperatura e velocidade do modelo oceânico CMEMS (*Copernicus Marine Environment Monitoring System*, disponível em: <https://marine.copernicus.eu/>).

Foi considerado um período inicial de 15 dias para aquecer o modelo. Os resultados simulados foram comparados com os dados coletados, para calibração e a validação do modelo. A intensidade e direção média do vento foram utilizadas para calibrar a tensão de cisalhamento, a maré para o nível da água (os valores de referência são relativos para cada local), as velocidades das correntes para os máximos de enchente e vazante, a salinidade para densidade das massas d'água e a descarga fluvial para o *input* de água doce. Para estruturar e calibrar o modelo, foram utilizados dados de 2014 até 2018. As análises das constituintes de maré astronômica foram realizadas pela biblioteca T\_Tide (Pawlowicz, 2002) através do software Matlab® a partir do marégrafo da Ilha da Paz e comparadas com os resultados de saída do nível da água (m) para calibrar os dados de entrada de maré. Os dados de nível de água foram referenciados ao nível médio do período observado em cada marégrafo, em função da ausência de uma referência de nível. Os campos de velocidade e de vazão foram comparados aos dados coletados *in situ* em 2019 para

calibração e validação. Com o modelo devidamente calibrado, as simulações de 2019 foram geradas e validadas com os dados do esforço amostral, apresentados nos resultados.

#### 4.3 MÓDULO LAGRANGEANO

Para uma análise simples do tempo de residência, em função da contribuição da descarga fluvial, pode-se usar a equação proposta por Kramer et al. (1994), que divide o volume total de água doce no estuário pelas taxas de descarga fluvial sobre um determinado período.

$$t = \text{Volume d'água doce (m}^3\text{)}/\text{Descarga fluvial (m}^3\text{ tempo}^{-1}\text{)}; \quad \text{Eq. 4}$$

O tempo médio de permanência da água na área considerada é definido como o tempo necessário até que o volume de água inicialmente em uma determinada região seja substituído por um novo volume de água. Isso pode ser aplicado ao estuário como um todo ou a uma única região ou setores de interesse (BRAUNSCHWEIG et al., 2003).

Para compreender o TR em função da hidrodinâmica do sistema, pode-se particionar o estuário em setores e aplicar uma distribuição de partículas que são interpretadas como traçadores, permitindo monitorar o ponto de origem, o tempo e o percurso dos traçadores lagrangeanos, até que estes saiam do sistema. A partir destas informações, as taxas de renovação da água são mensuradas assim como o tempo de residência em cada setor do sistema (BRAUNSCHWEIG et al., 2003) e calculadas a partir da relação:

$$f_{ij}(t) = \frac{V_{i,j}(t)}{V_{i,i}(0)}; \quad \text{Eq. 5}$$

O parâmetro  $f_{ij}$  mede a influência integrada da zona  $j$  sobre a zona  $i$  durante o tempo  $T$ . No início da simulação,  $f_{ij}(t)$  é igual a 1. Como a água é renovada dentro de uma zona, a contribuição da água inicial para o volume total da caixa diminui e  $f_{ij}(t)$  tende a 0. O tempo em que  $f_{ij}(t) = 0$  é o TR. Para calcular o tempo de residência de todas as zonas do sistema, pode-se aplicar a seguinte equação:

$$\text{TR} = \sum_{i=1}^n [F_{fi} \cdot V_i / Q]; \quad \text{Eq. 6}$$

onde o valor de  $V_i$  é o volume da zona  $i$  e  $n$  é número total de zonas do estuário.

Para gerar os resultados e quantificar o tempo de residência do estuário da Baía da Babitonga, foi utilizado o módulo de traçadores lagrangeanos, acoplado ao modelo hidrodinâmico MOHID. O TR foi estimado através do método lagrangeano com o lançamento de partículas em uma proporção de 1:100.000 do volume da área ( $m^3$ ), com as características da massa d'água. O tempo de residência adotado neste trabalho segue os critérios descritos por Braunschweig (2003), considerando as taxas de renovação d'água completa, quando 95% das partículas originárias saírem do sistema, desta forma evitando que uma pequena parcela de partículas residuais eleve o tempo de residência. A distribuição das partículas foi definida como instantânea e uniforme para toda a superfície do estuário, sem taxa de decaimento. Foram geradas duas simulações de 30 dias, nos períodos de verão e inverno, para quantificar o tempo de residência do estuário, assim como sua variabilidade sazonal. Para a análise do tempo de residência dos seis setores de interesse (Figura 1), as simulações foram geradas de forma individual para as estações de verão e inverno.

O Setor 1 compreende o Canal do Palmital, situado à margem da cidade de Joinville, recebendo suas contribuições e pressões deletérias. Abriga importante região de manguezais e áreas expostas durante a maré baixa, que devem ser considerados na análise do tempo de residência, por serem propícias para retenção das partículas.

O setor 2 está situado à margem da cidade de Joinville, essa região está no eixo central do estuário, entre o canal principal e os braços do Canal do Palmital e Canal do Linguado (setores 1 e 2). Recebe a contribuição do rio Cachoeira, maior aporte fluvial do estuário (68% em ambas estações), somado com os rios do primeiro setor, representam mais de 90% da descarga fluvial total (Figura 4).

O Setor 3 está situado no Canal do Linguado, aterrado na década de 1930, quando foi interrompido o livre acesso do canal ao mar, reconfigurando a hidrodinâmica estabelecida. A região tem atualmente características deposicionais, também com áreas de manguezal e baixio.

O quarto Setor está localizado no canal principal do estuário, recebendo a contribuição direta da maré de enchente, através dos setores 5 e 6, enquanto recebe as contribuições dos setores 1, 2 e 3 nas marés de vazante.

O Setor 5 está situado no canal principal, próximo à desembocadura e abrange os municípios portuários de Itapoá e São Francisco do Sul, sob pressão das atividades dos

municípios assim como de seus portos internacionais. Estes cinco primeiros setores somados representam a área total do estuário.

O Setor 6 abrange a região da pluma de sedimentos a frente do estuário, sendo o setor que mais recebe contribuições oceânicas. A zona do setor 6 funciona como um eixo na trajetória das partículas, que saem do sistema durante a maré vazante, assim como uma porcentagem delas reintroduzidas no sistema, com a maré enchente.

## 5 RESULTADOS

A primeira seção dos resultados é reservada para caracterização da hidrodinâmica; a segunda seção, para a validação do modelo escolhido, assim como sua aplicação e, na terceira seção, são analisados os produtos do módulo lagrangeano de partículas e o tempo de residência do estuário.

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO HIDRODINÂMICA

A análise de dados de precipitação entre 2014 e 2018 mostrou dois períodos característicos de precipitação pluviométrica descritos para a região; um período mais chuvoso compreendido pelo verão com média de 672 mm e um período menos chuvoso durante o inverno com média de 190 mm (Figura 4). Os resultados obtidos estão de acordo com trabalhos para a região (IME, 2003; BITENCOURT, 2012; CARDOSO, 2012).

Os resultados da descarga fluvial foram gerados a partir da média mensal ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) de 11 estações hidrográficas da Agência Nacional de Águas (ANA) dos períodos entre 2004 e 2018, com médias mensais de  $73,17 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$  no verão e  $46,35 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$  no inverno. Destaque para o Rio Cachoeira que representaram 68% da descarga total, o Rio Cubatão 17% e o Rio Braço 8% (Figura 4). Os dados das estações fluviométricas devem ser analisados com cautela por apresentarem variadas lacunas de dados (meses) ao longo do período de 14 anos de dados, e por não serem medidos na foz dos rios, devido a finalidade destas medições de vazão estar relacionada à manutenção do suprimento de água para abastecimento urbano, industrial e agrícola (MIRANDA, et al., 2002). O regime de vazão do sistema apresenta variabilidade sazonal (SCHETTINI & CARVALHO, 1999, CREMER, 2006, BITENCOURT, 2016).

A partir do dados dos marégrafo da Ilha da Paz e do Iate Clube de Joinville foram extraídas 60 constituintes harmônicas dos dados de nível (horário), sendo as principais



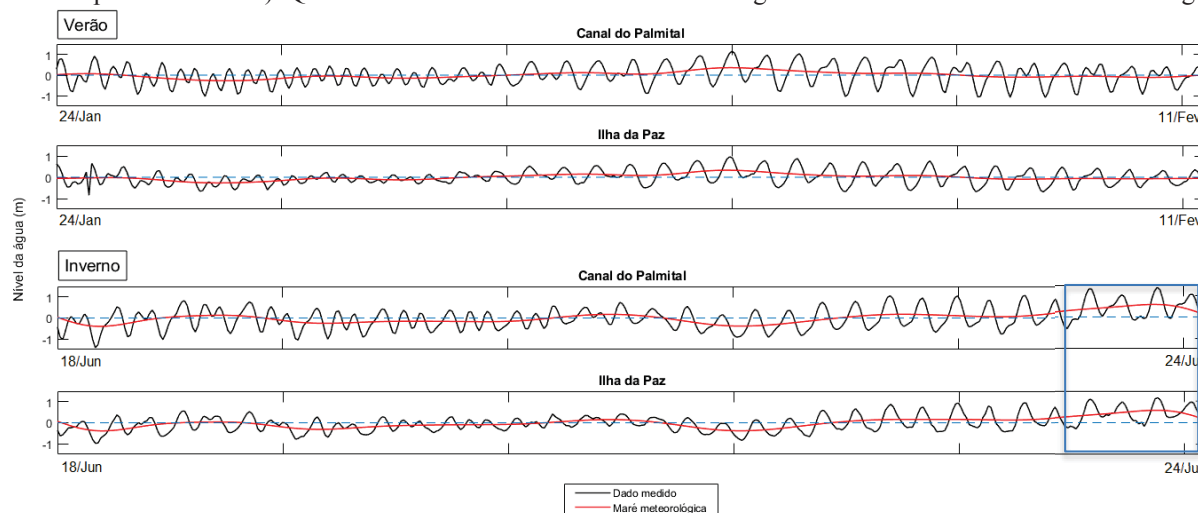
apresentadas na Tabela 2. Todas as constituintes extraídas estão no material suplementar no final do documento (Apêndice 1):

Tabela 2. Principais constituintes harmônicas de maré da Ilha da Paz e Iate Clube de Joinville, entre 2014 - 2018.

Frequência	Constituintes harmônicas	Ilha da Paz		Iate Clube Joinville	
		Amplitude (cm)	Fase (graus)	Amplitude (cm)	Fase (graus)
Diurnas:	O1	11.21	71,42	11.74	79.3
Semidiurnas:	M2	33.41	65,87	42.56	88.37
	S2	22.67	68,02	28.18	91.18
Terdiurna lunar	M3	6.32	68.02	13.64	227.14
Quarto-diurna	M4	11,92	135,6	21.73	222.69

As constituintes de maior amplitude foram as semi-diurnas M2 (26,3% da amplitude) e S2, também foram identificados dois grupos com amplitude significativa, a constituinte diurnas O1 e as componente de águas rasas M3 e M4. A amplificação da onda de maré entre a Ilha da Paz e a estação do Iate Clube Joinville variou entre as componentes, com destaque para as constituintes M3 e M4, com amplificações de 115% e 82% respectivamente. Para avaliar a influência de sistemas meteorológicos no sinal de maré foi aplicado um filtro de passa baixa Lanczos (THOMPSON, 1983) nos dados de nível coletados durante a campanha, retirando as frequências de até 40 horas (Figura 6).

Figura 6. Variação do nível da água (linha preta) ao longo de 19 dias durante o verão (24/01 a 11/02) e 37 dias durante o inverno (18/06 a 24/07). A linha vermelha representa a oscilação de baixa frequência com o uso do filtro Lanczos passa-baixa 40h). Quadro no final destaca o evento meteorológico de 18/07/2019 durante maré de sizígia.



As maiores variações de nível, em função da maré meteorológica, ocorreram durante o

evento meteorológico, na sizígia do inverno (18/07/2019), (Figura 6c e d). Esse evento de alta precipitação e fortes ventos de SE/S resultou em um acréscimo (0,5 m) no nível da água durante a sizígia.

De maneira geral, os gradientes longitudinais e verticais de salinidade apresentaram padrões parecidos durante a sizígia de verão e inverno (Figura 7). As isohalinas estão distribuídas mais verticalmente, caracterizando menor estratificação vertical, quando comparadas com as de quadratura (Figura 8). Com menores amplitudes de maré na quadratura, a influência do aporte fluvial fica mais evidente nos gradientes longitudinais de salinidade, intensificando a estratificação. Durante a campanha amostral de verão (Figuras 7a e 7b), o aporte fluvial apresentou maior influência no gradiente longitudinal de salinidade em relação à campanha de inverno (Figuras 7c e 7d).

Figura 7. Distribuição da salinidade ( $\text{g kg}^{-1}$ ) ao longo do estuário: (a) baixamar de verão (02/02/2019, 09:32 h – 10:46 h); (b) preamar de verão (13:29 h – 14:40 h), (c) baixamar de inverno (18/07/2019, 09:10 h – 10:11 h) e; (d) preamar de inverno (15:37 h – 16:37 h).

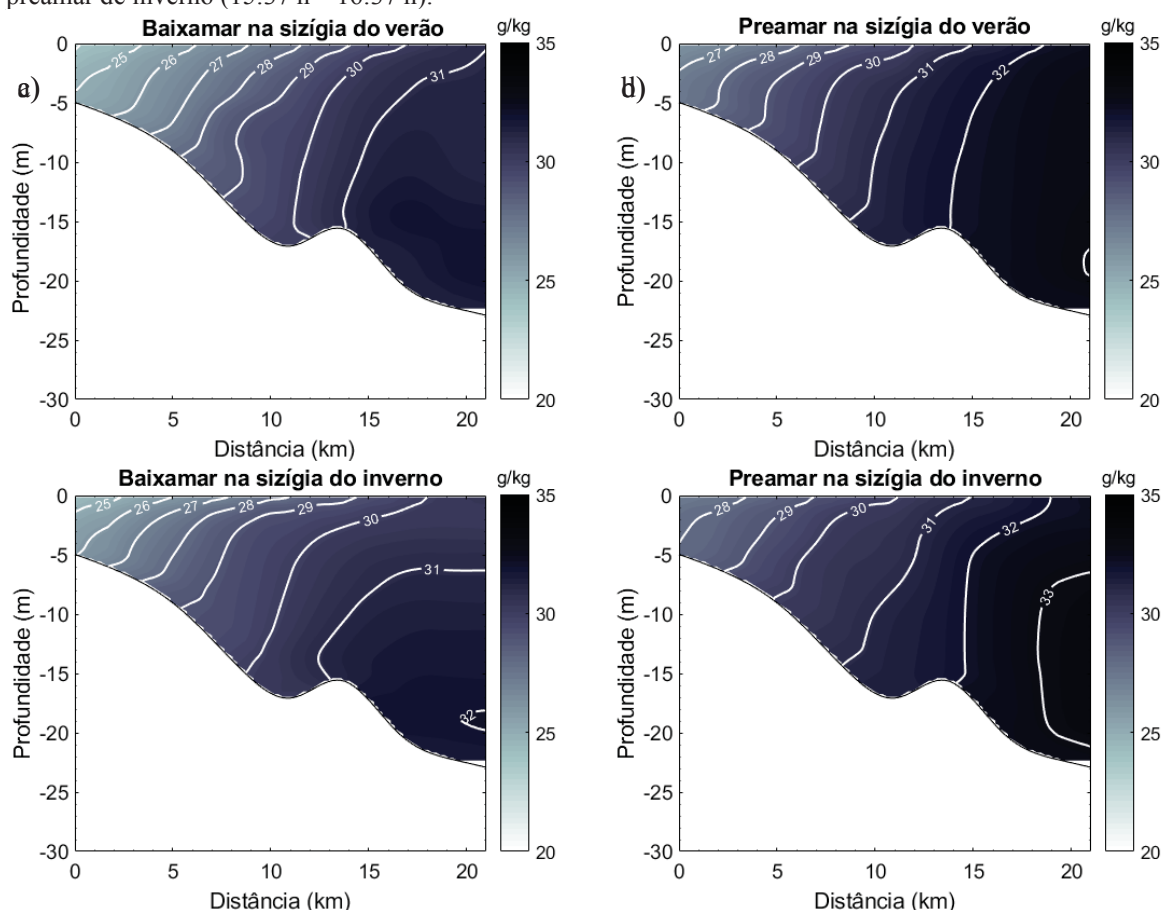
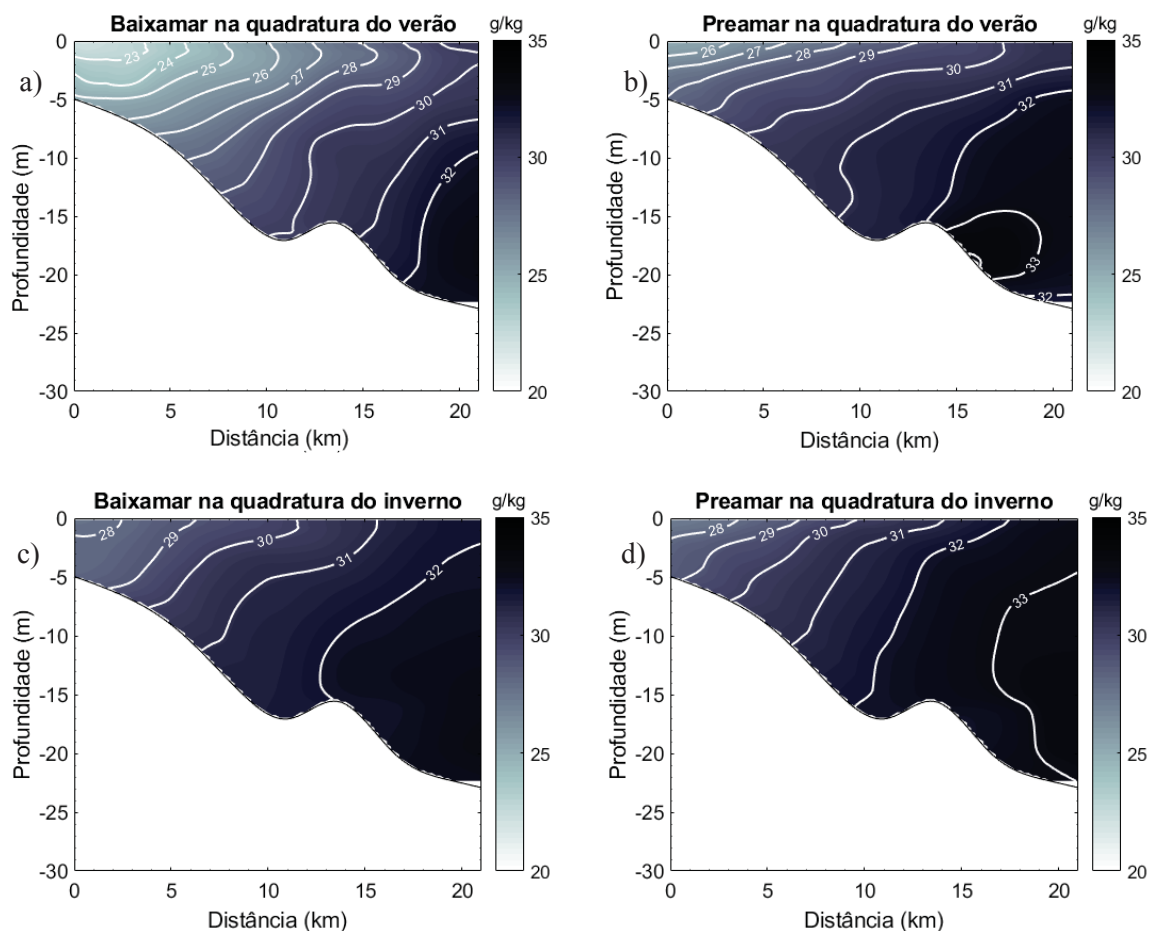


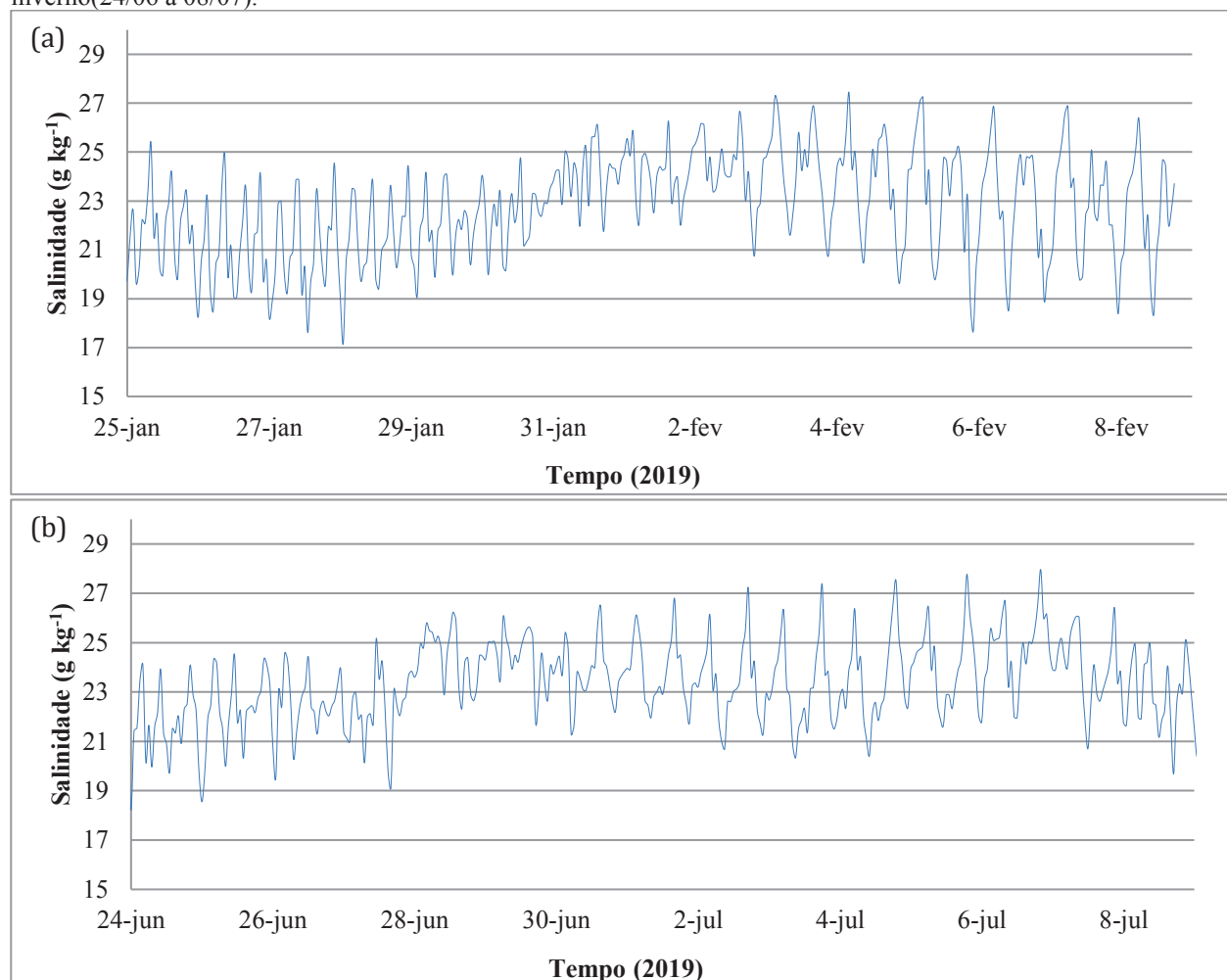
Figura 8. Distribuição da salinidade ( $\text{g kg}^{-1}$ ) ao longo do estuário: (a) baixamar de verão (30/01/2019, 08:50h – 10:05 h); (b) preamar de verão (12:53 h – 13:50 h), (c) baixamar de inverno (24/07/2019, 06:40 h – 07:35 h) e; (d) preamar de inverno (09:19 h – 10:26 h).



Durante a maré de sizígia no verão, o gradiente longitudinal de salinidade ( $\partial S/\partial x$ ) foi de -0,35 [ $\text{g kg}^{-1}$ ]  $\text{km}^{-1}$  a -0,39 [ $\text{g kg}^{-1}$ ]  $\text{km}^{-1}$  entre a baixamar e a preamar e, na sizígia de inverno, de 0,29 a -0,35 [ $\text{g kg}^{-1}$ ]  $\text{km}^{-1}$  (Figura 7). Na quadratura do verão, o gradiente entre a baixamar e a preamar variou de -0,31 a -0,41 [ $\text{g kg}^{-1}$ ]  $\text{km}^{-1}$  e, no inverno, se manteve constante (-0,30 [ $\text{g kg}^{-1}$ ]  $\text{km}^{-1}$ ) entre a baixamar e a preamar (Figura 8).

A variabilidade sazonal do aporte fluvial no Canal do Palmital (com médias de 700 mm no verão e 200 mm no inverno), indica uma baixa influência nas concentrações salinas de fundo, com média de 22,7  $\text{g kg}^{-1}$  durante o verão e 22,9  $\text{g kg}^{-1}$  no inverno (Figura 9).

Figura 9. Variabilidade da salinidade no fundo do Canal do Palmital durante: o (a) verão (de 25/01 a 08/02) e; (b) inverno (24/06 a 08/07).



## 5.2 MODELO HIDRODINÂMICO

Todas as simulações foram iniciadas no estofo da maré baixa, no dia com maior amplitude de maré da sizígia. As simulações foram geradas a partir do modelo hidrodinâmico MOHID 2DH, nos anos de 2014 até 2018 para calibração, utilizando o banco de dados construído para este trabalho. Com o modelo devidamente calibrado, foram geradas as simulações do ano de 2019 e validada com os dados obtidos *in situ*.

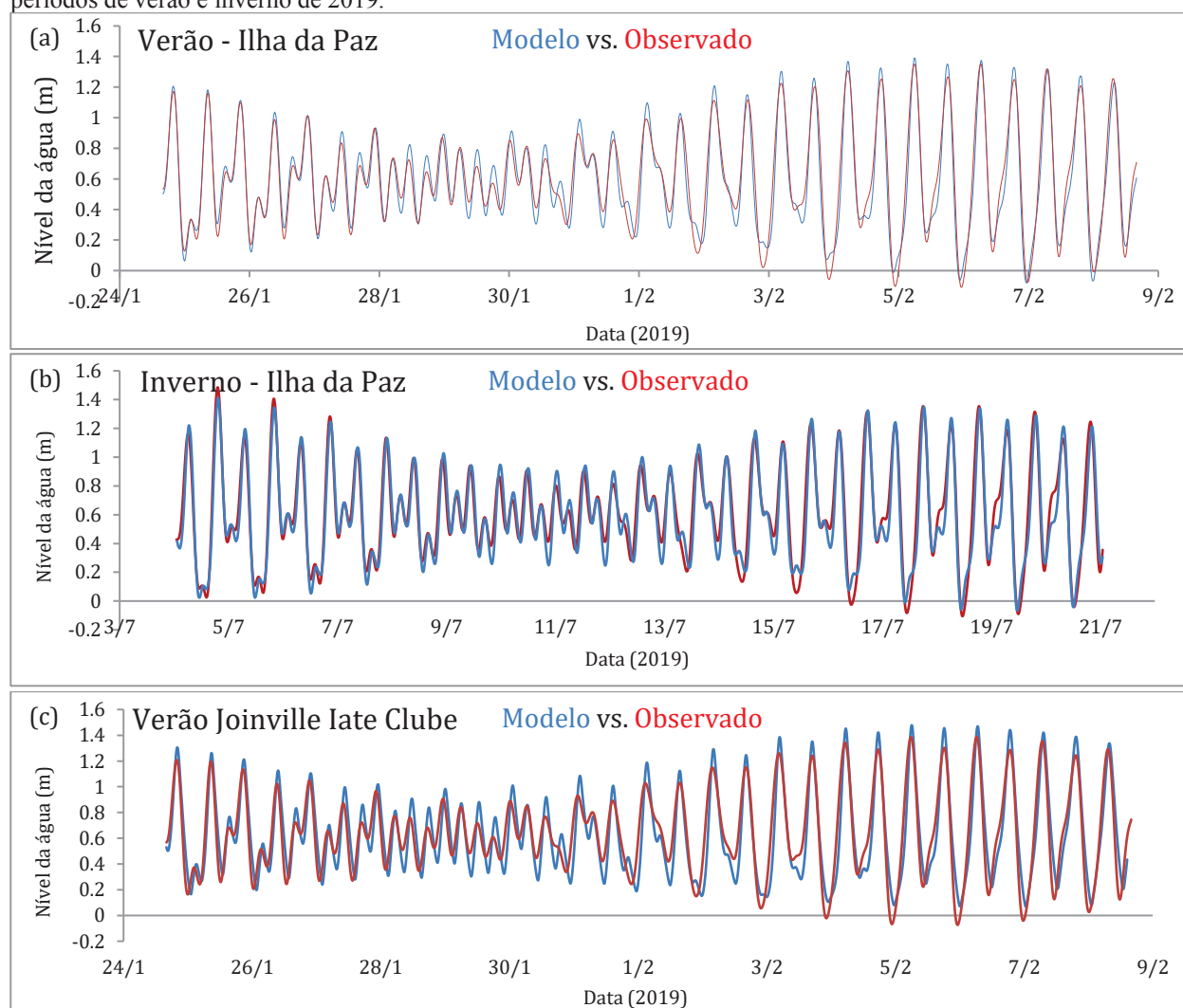
Os resultados de nível da água gerado pelas constituintes harmônicas extraídas do marégrafo na Ilha da Paz, próximo à desembocadura e às condições de contorno, apresentou a maior correlação de Pearson com os obtidos pelo modelo durante o período do verão ( $r = 0,97$ ) e no inverno ( $r = 0,96$ ) (Figuras 10a e 10b), resultado esperado pela sua proximidade em relação às condições de fronteira do modelo. Os resultados estatísticos apontam uma representação de alta precisão e acurácia também entre os resultados de nível no interior do estuário, apesar das condições de águas rasas, no marégrafo do Joinville Iate Clube (Figuras 10c e 10d) durante o

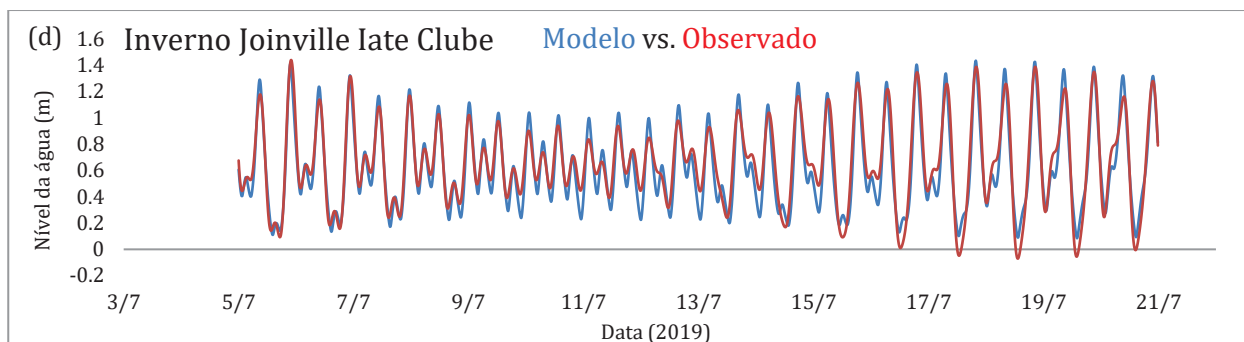
verão ( $r = 0,90$ ) e o inverno ( $r = 0,95$ ).

Tabela 3. Correlação de Pearson ( $r$ ), coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e RSME entre o nível da água gerado pelo modelo hidrodinâmico MOHID e os dados in situ para o período de verão e inverno de 2019.

Marégrafos	Verão			Inverno		
<u>Ilha da Paz</u> (-26°10'35.6" -48°29'08.0")	$r = 0,97$	$r^2 = 0,94$	RSME 0,08	$r = 0,96$	$r^2 = 0,92$	RSME 0,13
<u>São Francisco do Sul</u> (-26°14'18.0" -48°38'10.4")	$r = 0,95$	$r^2 = 0,90$	RSME 0,10	$r = 0,96$	$r^2 = 0,91$	RSME 0,09
<u>Joinville Iate Clube</u> (-26°17'30.6" -48°46'25.9")	$r = 0,90$	$r^2 = 0,81$	RSME 0,15	$r = 0,95$	$r^2 = 0,33$	RSME 0,10
<u>Canal do Palmital</u> (-26°13'23.3" -48°45'54.9")	$r = 0,92$	$r^2 = 0,85$	RSME 0,13	$r = 0,96$	$r^2 = 0,20$	RSME 0,18

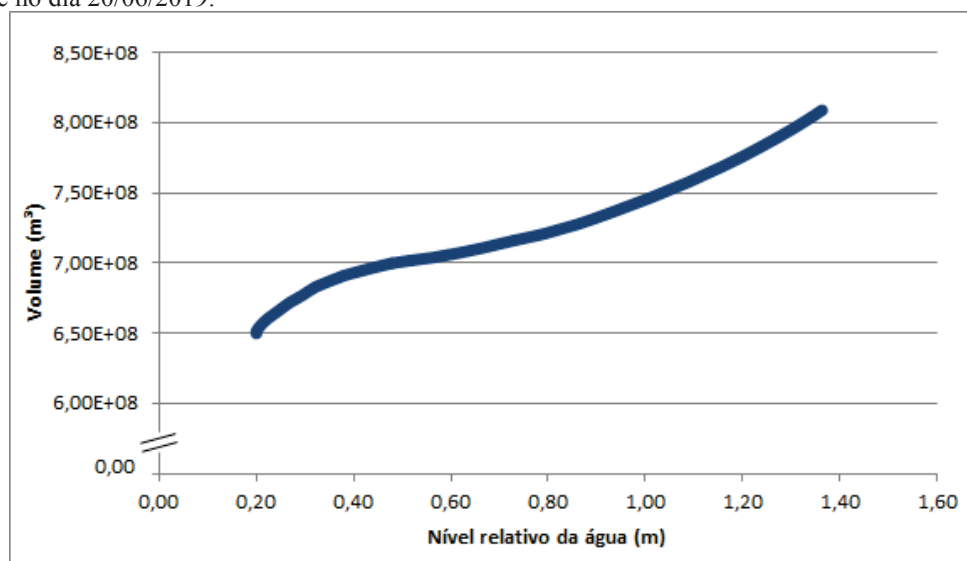
Figura 10. Dados de nível da água, gerado pelas constituintes harmônicas extraídas dos dados dos marégrafos: da Ilha da Paz (a) e (b), Joinville Iate Clube (c) e (d) e os dados de nível do modelo hidrodinâmico MOHID para os períodos de verão e inverno de 2019.





Além da dominância da maré de enchente com amplificação da altura da maré nas áreas mais interiores, causada principalmente por efeitos de fricção e estreitamento do canal principal (TRUCCOLO, 1999), foram identificadas variações sazonais do nível da água. Os valores médios de nível da água na desembocadura (Ilha da Paz), entre 2014 e 2018 foram 0,61 m durante o verão e 0,63 m no inverno. Enquanto na cabeceira do estuário (Joinville Iate Clube) as médias foram de 0,64 m no verão e 0,66 m no inverno, similares aos encontrados por Truccolo (2000), Vanz et al. (2015) e Bitencourt et al. (2016). A figura 11 faz uma relação do nível da água com o volume geral do estuário, na estação de São Francisco do Sul (20/06/2019). Quando considerada, essa relação nível/volume às condições da equação da continuidade e as pressões barotrópicas envolvidas, a variação do nível da água representa uma diferença importante no volume geral, fator que pode influenciar o comportamento hidrodinâmico e o tempo de residência do estuário.

Figura 11. Relação entre o nível da água em São Francisco do Sul e o volume do estuário, durante um período de enchente no dia 20/06/2019.



O aumento no nível da água durante o inverno foi bem representado nas simulações de 2014, 2018 e 2019, com seu respectivo aumento de volume. As diferenças de volume entre o verão ( $6,42 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ ) e o inverno ( $7,33 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ ) estão na ordem de  $10^7 \text{ m}^3$  (13%). Essa relação do

aumento de volume sazonal pode ser um fator significativo, quando se trata de tempo de residência e taxas de renovação da água de um sistema com essas dimensões.

Considerando a variabilidade média da amplitude de nível entre as estações mensuradas, o padrão do prisma de maré (P) do estuário acompanha a variabilidade de nível e respectivamente do seu volume. Durante o verão o prisma de maré na estação da Ilha da Paz foi de  $11,4 \times 10^7 \text{ m}^3$ , enquanto no inverno apresentou um prisma de  $11,8 \times 10^7 \text{ m}^3$ , utilizando a equação de  $P = H.A$ , sendo H a média da altura da maré (0,6 m) e A a área do estuário ( $188 \text{ km}^2$ ) (BARBER, 2003).

Para análise das velocidades das correntes, foram comparadas as velocidades registradas pelo ADP fundeado no Canal do Palmital (Figura 12 e 13) e as velocidades geradas pelo modelo, que representou bem as trocas de fase das marés. Durante a quadratura, o modelo foi bem representativo, no entanto durante a sizígia o modelo superestimou as velocidades de vazante e por consequência subestimou as taxas de renovação da água e o tempo de residência. Este cenário pode ser explicado pela dificuldade das equações de águas rasas em resolver as equações em regiões de baixio e manguezais, com correlação de Pearson de  $r = 0,61$  das componentes  $u$  para o verão e  $r = 0,16$  durante o inverno.

Figura 12. Comparação da componente  $u$  gerada pelo modelo e a medida pelo ADP no Canal do Palmital durante o o período de verão. Os valores positivos representam a enchente (+) e os negativos a vazante (-).

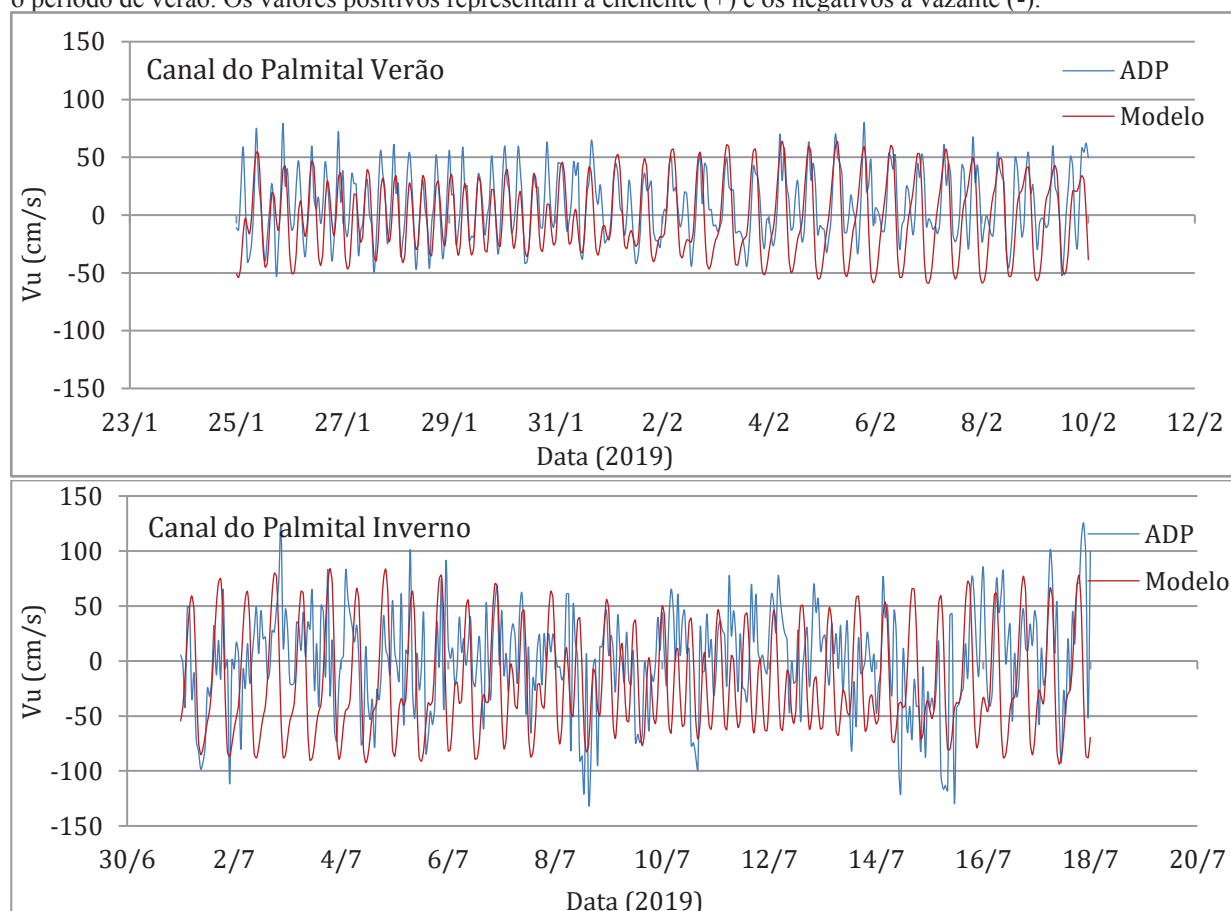
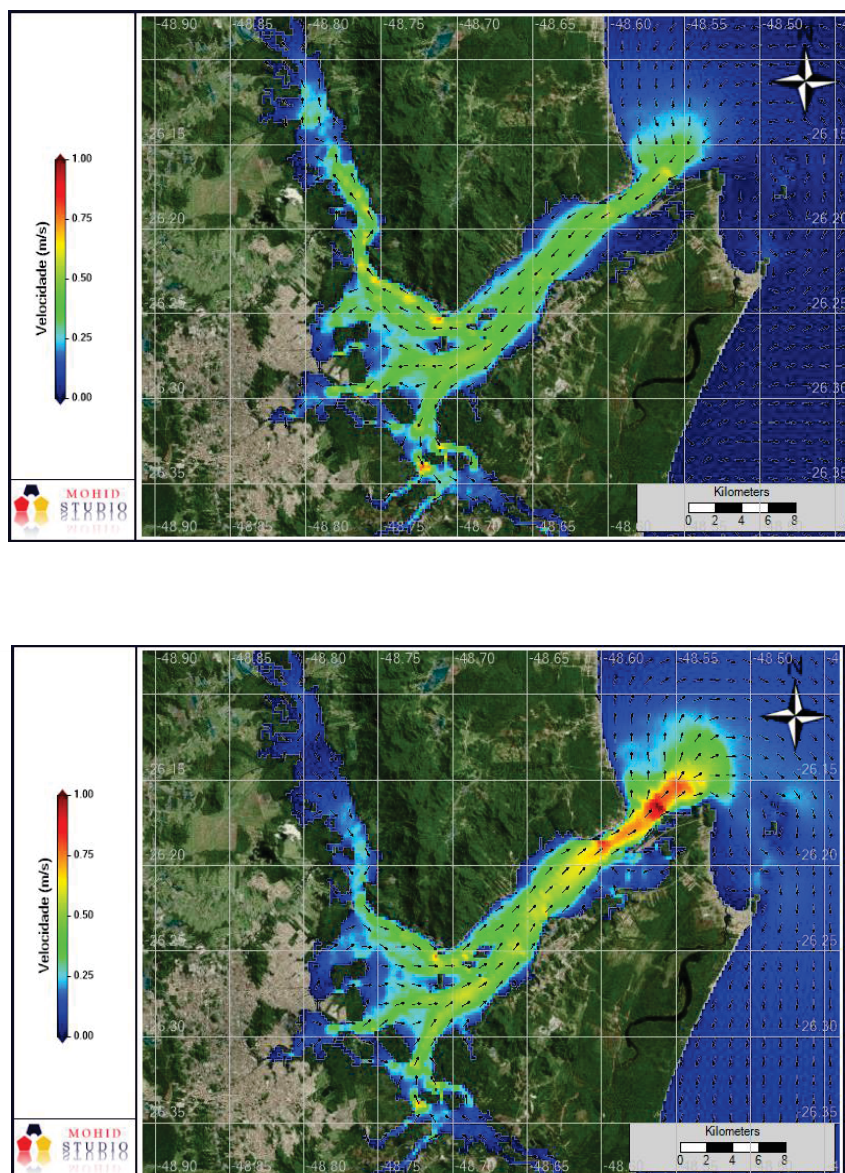




Figura 13. Resultados do modelo hidrodinâmico MOHID na Baía da Babitonga, com os vetores de velocidade nas marés de sizígia, durante a enchente (a) e a vazante (b) do dia 07/07/2019.



### 5.3 TEMPO DE RESIDÊNCIA

Foram geradas 14 simulações (uma simulação do estuário todo e os seis setores de interesse, para as duas estações) através do módulo lagrangeano no estuário da Baía da Babitonga, por 30 dias durante os períodos do verão e inverno. As partículas foram dispersadas de maneira instantânea e proporcional a cada volume, as distribuições das partículas são apresentadas na tabela 4.

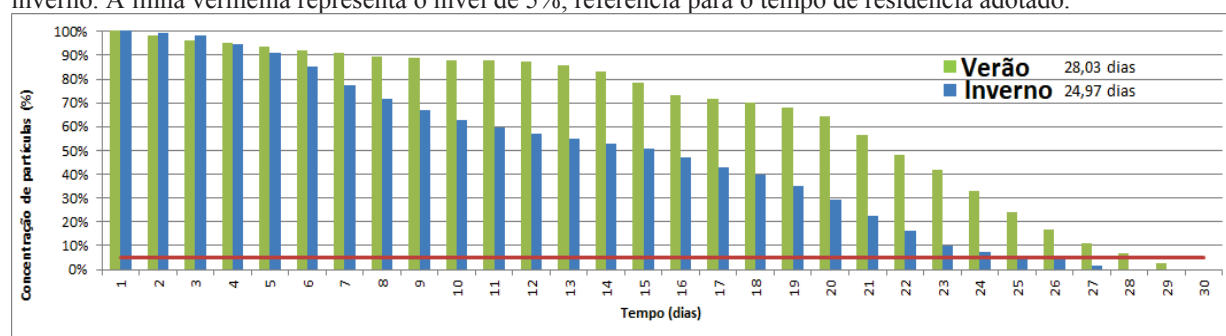


Tabela 4. Volume ( $m^3$ ), área e distribuição inicial das partículas para cada um dos setores. \*O Setor 6 incorpora a região da pluma estuarina, os cinco primeiros setores incorporam a área total do estuário.

<b>Volume total (<math>m^3</math>)</b>	7,30E+08					
<b>Número de partículas</b>	7.301					
<b>Setores</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>*6</b>
Volume inicial ( $m^3$ )	8,41E+07	1,56E+08	2,53E+07	1,67E+08	2,45E+08	2,45E+09
Número de partículas	841	1.563	253	1.670	2.452	24.596
Área do setor	50 km <sup>2</sup>	82 km <sup>2</sup>	22 km <sup>2</sup>	27 km <sup>2</sup>	43 km <sup>2</sup>	*203 km <sup>2</sup>
% da área total	22%	37%	10%	12%	19%	-
Profundidade média (m)	1,13	1,69	0,78	5,92	8,3	11,4

O tempo de residência do estuário como um todo durante o verão, período com maior intensidade descarga fluvial, foi de 28 dias e 24,97 dias no inverno (Figura 14);

Figura 14. Variação da concentração de partículas na Baía da Babitonga por dia, para os períodos de verão e inverno. A linha vermelha representa o nível de 5%, referência para o tempo de residência adotado.



Os resultados dos seis setores, permitiu avaliar o comportamento das taxas de renovação da água e o tempo de residência de maneira mais criteriosa, em função das características de cada um dos setores de interesse (Tabela 5). Este tipo de abordagem permite identificar e qualificar as regiões de sensibilidade, assim como, aquelas que influenciam no tempo de residência geral do estuário.

Tabela 5. Tempo de residência dos setores para os períodos de verão e inverno.

	<b>Tempo de residência (dias)</b>					
	<b>Setor 1</b>	<b>Setor 2</b>	<b>Setor 3</b>	<b>Setor 4</b>	<b>Setor 5</b>	<b>Setor 6</b>
Verão	11,51	5,09	5,07	4,02	5,07	11,02
Inverno	11,58	5,10	5,12	4,07	5,60	11,13

O tempo de residência estimado do primeiro setor durante o verão foi de 11,51 dias e no

inverno 11,58 dias, apresentando o maior tempo de residência entre os seis setores. O setor recebe significativa contribuição fluvial dos rios: Cubatão, Três Barras e Pirabeiraba, que somados representam 29% da contribuição fluvial no verão e 22% no inverno. Esta variabilidade sazonal de 0,07 dias (100 min) no tempo de residência deste setor qualifica a diferença sazonal da descarga fluvial de 7% como sendo mais expressiva durante o verão, do que o aumento de 12,7% do seu volume durante o inverno.

No segundo setor, o tempo de residência estimado durante o verão foi de 5,09 dias e no inverno 5,10 dias, apresentando altas taxas de renovação do seu volume, apesar do setor abrigar manguezais e baixios, que devem ser considerados na dispersão das partículas. A inexistente variabilidade sazonal, pode ser atribuída à sua posição central entre os eixos do estuário.

O setor 3 apresentou tempo de residência durante o verão de 5,07 dias e no inverno 5,12 dias. Apesar da região ter características de região deposicional, que apresenta assoreamento, o tempo de residência é baixo. O setor 3 teve a menor quantidade partículas, em função do seu volume inicial (proporção mantida).

Os três primeiros setores encobrem as regiões que recebem diretamente a descarga fluvial, influenciando diretamente nas taxas de renovação e tempo de residência. São os mais suscetíveis aos processos biológicos de produção primária, reprodução, desova e estágios iniciais de desenvolvimento (SANTOS, 2017) por serem as áreas abrigadas e rasas, entretanto, são também os setores mais suscetíveis à presença de contaminantes, como as concentrações de metais pesados apresentado por Souza (2016).

O setor 4 delimita a fronteira do canal principal profundo com as regiões de baixio. Seu tempo de residência foi de 4,02 dias durante o verão e 4,07 dias no inverno, menores valores estimados para todo o estuário, caracterizando a região como uma zona de transição rápida nas trocas das massas.

O quinto setor apresenta características de zona de transição rápida, com tempos de residência de 5,07 dias no verão e 5,60 dias no inverno.

A posição do setor 6 nos permite fazer um balanço qualitativo geral da situação do estuário, assim como quantitativo, em situações emergenciais, ou no estudo e produção de ações preventivas. O tempo de residência do setor é de 11,02 dias no verão e 11,13 dias no inverno.

De maneira geral, as simulações dos setores individuais apresentaram um tempo de residência ligeiramente maior no inverno do que no verão, resultado oposto apresentado pelo panorama geral, que apresentou valores menores durante o inverno em relação ao verão.

## **6 DISCUSSÃO**

A circulação das águas de um estuário depende diretamente das condições hidrodinâmicas, gerada pela combinação ou predominância da descarga de água doce, da

influência do vento e da propagação da onda de maré (DYER, 1995; GEYER, 1997). Independentemente do grau de mistura de um estuário, a circulação é influenciada pelos campos baroclínicos e barotrópicos de pressão (MIRANDA et al., 2002).

De acordo com as observações realizadas, os resultados apontam a maré como principal reguladora da variabilidade de salinidade, densidade e dos fluxos longitudinais do estuário, com os valores de salinidade em fase com o nível da água e as correntes de maré, tendo a contribuição fluvial e sua variabilidade sazonal (Figura 4), um papel secundário ao longo do ano. A variabilidade sazonal mostrou ser menos importante no regime hidrográfico do que as mudanças quinzenais da lua, e até mesmo dos eventos episódicos de aumento do nível da água, causado pela passagem das frentes frias durante o inverno

A distribuição da salinidade ao longo do estuário, o caracteriza como um estuário fracamente estratificado, com pequenas variações quinzenais e sazonais. A salinidade da água que entra no estuário foi constante durante todas as campanhas e a amplitude de variação entre as marés também foi baixa ( $<4 \text{ g kg}^{-1}$ ) (Figuras 7 e 8). De acordo com Dyer (1997), em estuários bem misturados a amplitude de maré é grande o suficiente para proporcionar a homogeneização vertical e a onda de maré se propaga por grandes distâncias estuário adentro e a mistura tende a ser dominada principalmente pela turbulência com o fundo. Os resultados apontam que o ciclo entre marés e o ciclo de quadratura e sizígia são mais importantes no controle da hidrodinâmica da Baía da Babitonga do que a escala sazonal.

A variabilidade sazonal das massas d'água na plataforma sudeste não parecem influenciar significativamente a intrusão salina no estuário. O valor máximo de salinidade durante as quatro campanhas ( $33,4 \text{ g kg}^{-1}$ ) não caracteriza a influência da Água Tropical - AT ( $S > 36$ ) durante o verão ou a Água da Pluma do Prata - APP ( $S < 32,5$ ) no inverno (EMILSSON, 1961; CAMPOS ET AL., 1995; PIOLA ET AL., 2008). Os valores de salinidade sugerem que a diluição de águas marinhas com o escoamento continental controlam a salinidade na plataforma interna próximo a Baía da Babitonga.

Considerando que o período de 6 anos (2014-2019) para gerar as médias no comportamento dos ventos não representam uma análise climatológica completa, segundo a Organização Meteorológica Mundial (30 anos consecutivos), o período amostrado sugere uma baixa variabilidade no comportamento dos ventos (Figura 2 e 3), não apresentando fatores de influência direta na variabilidade sazonal da hidrodinâmica durante o período. A variabilidade sazonal da precipitação e da descarga fluvial (Figura 4) caracterizam a variabilidade prevista na primeira hipótese, em que existe variabilidade sazonal dos fluxos de descarga fluvial no sistema. Porém, essa variação sazonal não contribui significativamente com a variabilidade do tempo de residência no estuário de maneira geral, com 10,8% a mais de tempo de residência durante o

verão, mesmo com maiores descargas fluviais (Figura 14). Essa característica fica mais evidente nos setores mais internos, que recebem maior aporte fluvial, onde há sazonalidade na descarga fluvial expressiva, refutando assim a segunda hipótese, na qual o aumento da descarga fluvial, afetaria o tempo de residência do estuário. No entanto, existe uma variabilidade sazonal no tempo de residência do estuário (três dias), gerada essencialmente pela maré, com o acréscimo médio do nível da água e respectivamente no volume geral do estuário durante o inverno.

Considerando que a maré como principal forçante que rege a hidrodinâmica do estuário da Baía da Babitonga, a aplicação do modelo 2DH apresentou resultados precisos e de qualidade, apesar das irregularidades espacial e temporal dos dados de batimetria e aporte fluvial disponíveis. A forte correlação do modelo com os dados de nível da água (Tabela 5), principal forçante dos padrões de circulação, proporciona confiabilidade ao modelo (BRAUNSCHWEIG et al., 2003; GLOCK, 2019). Sendo assim, pode-se relacionar a variabilidade sazonal da hidrodinâmica à maré e ao aumento de nível durante o inverno, e de forma menos expressiva pelo aporte fluvial (Figura 4) e também pelas condições dos ventos locais (Figuras 2 e 3).

O maior tempo de residência no verão (28 dias) em relação ao inverno (25 dias) (Figura 14), representa uma variação de 10,92% e caracteriza a sazonalidade na concentração das partículas. Durante o verão as concentrações acompanham essencialmente os momentos de maré de sizígia e a contribuição fluvial, enquanto no inverno, o aporte fluvial é menos expressivo. Ou seja, as marés de sizígia e de quadratura de inverno têm energia suficiente para renovar as massas d'água do estuário em menos tempo do que o verão, com as maiores contribuições fluviais. Estes resultados contribuem para compreensão do comportamento hidrodinâmico do estuário, sendo a maré, a forçante mais significativa e a respectiva variabilidade sazonal do volume em função do nível, tanto nos resultados hidrodinâmicos como no tempo de residência. A influência da descarga fluvial e sua variabilidade sazonal (Figura 4) e os padrões de vento (Figura 2 e 3) tem baixa influência direta nas taxas de renovação das águas do estuário nas condições estudadas.

Os resultados apontam que a taxa de renovação das águas é mais lenta (maior TR) durante o verão, mesmo com as maiores contribuições fluviais, em relação ao inverno. Essa característica pode ser avaliada com o apoio dos resultados do setor mais interno, onde as variações sazonais da descarga fluvial são mais evidentes. Essa relação pode ser avaliada a partir da análise do tempo de residência (Figura 14), onde o processo de renovação das águas é mais rápido durante os primeiros cinco dias no verão, em função do aporte fluvial e da maré de sizígia. A partir do quinto dia, as condições de energia da maré diminuem com a quadratura, assim como as taxas de saída das partículas do setor. Já no inverno, os padrões das partículas se

comportam de maneira mais expressiva, tanto na sizígia quanto na quadratura, apesar da contribuição fluvial sem menos expressiva (Figura 4). Essa relação durante o inverno pode ser explicada pelo aumento do seu volume em função do aumento do nível da água (Figura 11).

Os três setores internos representam as regiões que recebem diretamente a descarga fluvial, influenciando diretamente nas taxas de renovação e tempo de residência, entretanto, também são as regiões com maiores amplitudes de maré (com amplificação das constituintes harmônicas da Ilha da Paz até Joinville, de 115% da M3 e 82% da M4), dificultando uma análise quantitativa da influência destes dois agentes, nos padrões de tempo de residência dos setores. A amplificação da maré com característica de estuário hipsíncrono, em função dos efeitos da diminuição da profundidade e estreitamento dos canais, de acordo com Truccolo (2010), são fatores que indiretamente também influenciam no tempo de residência dessas áreas, por serem regiões de baixios e manguezais com capacidade de aprisionamento de partículas. Os setores 1 e 2 estão situados na costa do município de Joinville, suscetíveis às contribuições e pressões antrópicas diretas. O terceiro Setor está no limite imposto pelo aterro do canal do Linguado, região com altas taxas de deposição em função do aterro que fechou o canal na década de 1930.

Os três setores internos são os mais suscetíveis aos processos biológicos de produção primária, reprodução, desova e estágios iniciais de desenvolvimento (SANTOS, 2017) em função dos maiores valores de TR e também por serem as áreas mais abrigadas e rasas. São também os setores de interface, das principais trocas geoquímicas das porções continentais, com maiores concentrações de nutrientes e matéria orgânica. Embora o primeiro setor tenha apresentado o maior valor de tempo de residência, as taxas de renovação são altas, se forem comparadas a outras regiões interioranas de estuários ou baías (BRAUNSCHWEIG, 2003; KENOV, 2012; FRANZ 2014; GLOCK, 2019). Deve-se ter cautela ao comparar o tempo de residência entre diferentes sistemas, em função das suas características específicas.

Os setores 4, 5 e 6 representam o canal principal e a desembocadura, ou seja, prevalecem os processos de interação com o oceano. Abrigam os dois portos internacionais de cargas do estuário, sendo possíveis fontes de ação antropogênica deletéria.

O setor 6 está situado na desembocadura e região da pluma estuarina. Os resultados de tempo de residência de 11,02 dias no verão e 11,13 dias no inverno e a posição deste setor permite um balanço qualitativo geral da situação do estuário. As escalas de tempo do TR e dos processos de renovação da água podem, além de qualificar e quantificar as condições do estuário, ser utilizadas como parâmetro de classificação (DYER, 1973; TAKEOKA, 1984).

## 7 CONCLUSÃO

O estudo caracterizou, pela primeira vez, as principais forçantes e contribuições para a hidrodinâmica da Baía da Babitonga, assim como o tempo de residência, as taxas de renovação

da água e sua variabilidade sazonal. A implementação do modelo hidrodinâmico MOHID 2DH, demonstrou-se satisfatória, apresentando forte correlação com os dados observados de nível da água.

Em suma, a primeira hipótese, de que existe variabilidade sazonal dos fluxos de descarga fluvial no sistema foi comprovada que existe uma variabilidade sazonal na descarga d'água, em função da precipitação, apresentando no verão, quase o dobro do valor do que o período de inverno. Em relação à segunda hipótese, se o aumento da descarga fluvial afeta o tempo de residência do estuário foi refutada, pois as maiores taxas de descarga fluvial não influenciaram significativamente no tempo de residência do estuário, onde a maré demonstrou maior representatividade nos processos de renovação da água.

Os resultados do tempo de residência, assim como a capacidade do estuário de se renovar, podem servir como ferramenta qualitativa e quantitativa da situação do estuário, de suporte para situações emergenciais ou preventivas da região ou até mesmo de fomento para estudos que utilizem o tempo de residência como referência.

## REFERÊNCIAS

- ANGULO, R. J. et al. Mapa geológico da planície costeira entre o Rio Saí-Guaçu e a Baía de São Francisco, litoral Norte do Estado de Santa Catarina. Boletim Paranaense de Geociências, n. 55, p. 09-23, Editora UFPR. (2004).
- BARBER, R. W. Analytical modeling of Pollution Flushing in Well-Mixed Tidal Embayments. Elsevier, chapter 17, pg 469. (2003).
- BARBOSA, A. & MAZZER, A. M., Mudanças geomorfológicas ocorridas na desembocadura no sul do canal do Linguado no período de 1938-1989. Revista da Univille, 9(1): 117-124. (2003).
- BITENCOURT, DANIEL PIRES, MÁRCIA VETROMILLA FUENTES, AND DANIEL SAMPAIO CALEARO. "Análise de variáveis atmosféricas observadas em alta resolução espaço-temporal durante um experimento de 30 dias na Mesorregião da Ilha de Santa Catarina." Revista Brasileira de Meteorologia 31.2: 122-140. (2016).
- BERTIN, X., OLIVEIRA, A., FORTUNATO, A.B., Simulating morphodynamics with unstructured grids: description and validation of a modeling system for coastal applications. Ocean Modelling 28, 75–87. (2009).
- BRAUNSCHWEIG, F., CHAMBEL, P., MARTINS, F., NEVES, R., A methodology to estimate the residence time of estuaries. Ocean Dynamics. 53, 137-145. (2003).
- BRICHENO, L. M., WOLF, J. M. AND BROWN, J. M. Impacts of high resolution model downscaling in coastal regions. Continental Shelf Research, 87, pp.7-16. (2014).
- BRIÈRE, C., ABADIE, S., BRETEL, P., LANG, P., Assessment of TELEMAC system performances, a hydrodynamic case study of Anglet, France. Coastal Engineering 54 (4), 345–356. (2007).
- CAMPOS, E. J. D., GONÇALVES, J. E., AND IKEDA, Y. Water mass characteristics and geostrophic circulation in the South Brazil Bight: Summer of 1991, J. Geophys. Res., 100 (C9):18537–18550. (1995).
- CARDOSO, C. S.; BITENCOURT, D. P.; MENDONÇA, M. Comportamento do vento no setor leste de Santa Catarina sob influência de Ciclones Extratropicais. Revista Brasileira de Meteorologia, v.27, n.1, 39 - 48, (2012).
- CREMER, M. J.; MORAES, P. R. D.; OLIVEIRA, T. M. N. Diagnóstico Ambiental da Baía da Babitonga. Joinville: UNIVILLE. 256 p. (2006).
- CRISTOFOLINI, L.; FOGLIATTO, M. M.; MOREIRA, M. E. Análise socioambiental do fechamento do canal do Linguado/SC. Revista Geográfica de América Central, v. 2, n. 47E, p. 1-8, (2011).
- D'AQUINO, CARLA DE ABREU et al. Caracterização oceanográfica e do transporte de sedimentos em suspensão no estuário do Rio Mampituba, SC. *Revista Brasileira de Geofísica*, 29(2), 217-230. (2011).



PEREIRA, D. (2020). Wind Rose (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/47248-wind-rose>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved March 9, 2020.

DRONKERS, J., Tidal asymmetry and estuarine morphology. *Netherlands Journal of Sea Research*, 20(2/3), 117 – 131. (1986).

DYER, K. D. Sediment transport processes in estuaries. In: *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*, G.M.E. Perillo (ed.). Developments in Sedimentology, 53. Elsevier Science, 423-449 p. (1995).

DYER, K. D. *Estuaries - A physical Introduction*. Chichester: J. Wiley & Sons,. 195p. (1997).

EMILSSON, I. The shelf and coastal waters off southern Brazil. *Bol. Inst. Oceanogr.*, 11(2):101-112. (1961).

ENGEL, F., FALCK, R., BÖHM, S., DOS, M., SILVEIRA, S., DELL 'AGNOLO, E. C., & POLETTE, M., O Canal do Linguado da Baía da Babitonga/SC: Uma retrospectiva através da história e considerações sobre uma possível reabertura. 32(65), 87–101. (2017).

FILHO, J. B.; MIRANDA, L. B. DE. Estimativa da descarga de água doce no sistema estuarino-lagunar de Cananéia-Iguape. *Revista Brasileira de Oceanografia*, v. 45, n. 1–2, p. 89–94, (1997).

FRANZ, GUILHERME & PINTO, LÍGIA & KENOV, ISABELLA & MATEUS, MARCOS & FERNANDES, RODRIGO & LEITÃO, PAULO & NEVES, RAMIRO. Modelling of cohesive sediment dynamics in tidal estuarine systems: Case study of Tagus estuary, Portugal. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 151. 34-44. (2014).

GAPLAN. *Atlas de Santa Catarina*. Subchefia de Estatística, Geografia e Informática. Rio de Janeiro: Aerofoto Cruzeiro, 173p. (1986).

GEYER W. R. Influence of Wind on Dynamics and Flushing of Shallow Estuaries. *Est. Coast. Shelf Sci.*, 44: 713-722. (1997).

GLOCK, KURT, et al. "Comparison of hydrodynamics simulated by 1D, 2D and 3D models focusing on bed shear stresses." *Water* 11.2: 226. (2019).

GÓMEZ-GESTEIRA. M; DE CASTRO. M; R. PREGO. Dependence of the water residence time in Ria of Pontevedra (NW Spain) on the seawater inflow and the river discharge. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Vol. 58 .567–573, (2003).

GONÇALVES, M. L. & ZANOTELLI, C. T. & OLIVEIRA, F. A. Diagnóstico e prognóstico das disponibilidades e demandas hídricas do rio Cubatão do Norte – Joinville – Santa Catarina. Joinville: Editora da Univille, 96p. (2006).

GILLANDERS B. M., ELSDON TRAVIS S., HALLIDAY IAN A., JENKINS GREGORY P., ROBINS JULIE B., VALESINI FIONA J. Potential effects of climate change on Australian estuaries and fish utilising estuaries: a review. *Marine and Freshwater Research* 62, 1115-1131. (2011).

HAYATININGSIH, I., Development of a water quality model for Paranaguá Bay. Kiel–Alemanha, 98f. Report– Coastal Research Laboratory, Institute of Geosciences, Christian Albrechts University, Kiel, Alemanha. (2007).



HAYES, M.O. Morphology of Sand Accumulation in Estuaries. In: L.E. Cronin (Ed), Estuarine Research. Academic Press, New York, vol. 2, pp. 3-22. (1975).

HU, K., DING, P., WANG, Z., & YANG, S. A 2D/3D hydrodynamic and sediment transport model for the Yangtze Estuary, China. *Journal of Marine Systems*, 77(1–2), 114–136. (2009).

IME/DNIT., Diagnóstico dos estudos de circulação de água no Canal do Linguado e na Baía da Babitonga. (2003).

KAUL, P. F. T.; TEIXEIRA, W. Archean and early proterozoic complexes of Santa Catarina, Parana and São Paulo states, south-southeastern Brazil: an outline of their geological evolution. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, v. 12, n. 1, p. 172-182, (1982).

KRAMER, K.J.M., U.H. Brockman and R.M. Warrick. Tidal Estuaries: Manual of Sampling and Analytical Procedures. Balkema, Rotterdam, 304 pp. (1994).

KJERFVE, B. Estuarine geomorphology and physical oceanography. In: Jr, J.D., Hall, C. (Eds. *Estuarine Ecology*. Ed. John Wiley & Sons. p.47-78. (1989).

KENOV, I. A., GARCIA, A.C., & NEVES, R. "Residence time of water in the Mondego estuary (Portugal)." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 106: 13-22. (2012).

LACERDA L. D., Os manguezais do Brasil. In: VANNUCCI, M. (Ed.). Os manguezais e nós: uma síntese de percepções. São Paulo: EdUSP, p. 185-196. (1999).

LE HIR, P.; ROBERTS, W.; CAZAILLET, O.; CHRISTIE, M.; BASSOULLET, P.; BACHER, C. Characterization of intertidal flat hydrodynamics. *Continental Shelf Research*, 20, 1433 – 1459. (2000).

LESSER, G. R., ROELVINK, J. A., VAN KESTER, J. A. T. M., & STELLING, G. S., Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 51(8–9), 883–915. (2004).

LUCAS, L.V., KOSEFF, J.R., MONISMITH S.G. Processes governing phytoplankton blooms in estuaries. II. The role of horizontal transport. *Mar Ecol Prog Ser* 187: 17–30, (1999).

MACCREADY, P., GEYER, W.R., Advances in estuarine physics. *Ann. Rev. Mar. Sci.* 2, 35–58. doi:10.1146/annurev-marine-120308-081015. (2010).

MALHADAS, MADALENA S., et al. "Influence of tide and waves on water renewal in Óbidos Lagoon, Portugal." *Ocean Dynamics* 60.1: 41-55. (2010).

MARALDI, C., CHANUT, J., LEVIER, B., AYOUB, N., DE MEY, P., REFFRAY, G., LYARD, F., CAILLEAU, S., DRÉVILLON, M., FANJUL, E., SOTILLO, M.G. NEMO on the shelf: assessment of the Iberia-Biscay-Ireland configuration. *Ocean Science*, 9, pp.745-771. (2013).

MARÍA C.C.Q., JESÚS G., ERWAN G., JAVIER D.C., FLÁVIO M., JUAN M. Effects of tidal and river discharge forcings on tidal propagation along the Guadiana Estuary, *Journal of Sea Research*, Volume 146, Pages 1-13, (2019).

MARTINS, C. C., CABRAL, A. C., BARBOSA-CINTRA, S. C. T., DAUNER, A. L. L., &

- SOUZA, F. M. An integrated evaluation of molecular marker indices and linear alkylbenzenes (LABs) to measure sewage input in a subtropical estuary (Babitonga Bay, Brazil). *Environmental Pollution*, 188, 71–80. (2014).
- MASSELINK, G.; HUGHES, M. *Introduction to Coastal Processes and Geomorphology*. London: Arnold. (2003).
- MATEUS, M., RIFLET, G., CHAMBEL, P., FERNANDES, L., FERNANDES, R., JULIANO, M., CAMPUZANO, F., DE PABLO, H., NEVES, R.,. An operational model for the West Iberian coast: products and services, *Ocean Science* 8, 713-732. (2012).
- MAZZER, A. & GONÇALVES, M. Aspectos geomorfológicos da Baía da Babitonga, Santa Catarina , Brasil: Caracterização morfométrica. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. 12. (2012).
- MIRANDA LB, CASTRO BM & KJERFVE B., *Princípios de Oceanografia Física de Estuários*. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 424 pp. (2002).
- PAWLOWICZ, R. BEARDSLEY, B., AND LENTZ, S. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T\_TIDE, *Computers and Geosciences* 28, 929-937. (2002).
- PEREIRA, M. D. et al . Hidrodinâmica e transporte de material particulado em suspensão sazonal em um estuário dominado por maré: Estuário de Caravelas (BA). *Rev. Bras. Geof.*, São Paulo , v. 28, n. 3, p. 427-444, Sept. (2010).
- PERILLO, G.M.E. Definitions and Geomorphologic Classification of Estuaries. In: *Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*. Chapter 2. *Developments in Sedimentology*, 53, Elsevier Science. (1995).
- PIERINI, J. O., CAMPUZANO, F. J., LEITÃO, P. C., GÓMEZ, E. A., & NEVES, R. J. Atmospheric Influence Over the Residence Time in the Bahia Blanca Estuary, Argentina. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*. (2018).
- PINTO, A.B. FORTUNATO, Y. ZHANG, A. OLIVEIRA, F.E.P. SANCHO Corrigendum to "Development and validation of a three-dimensional morphodynamic modelling system for non-cohesive sediments" [*Ocean Modell.* 57–58C 1–14] *Ocean Modelling*, Volume 61, January Pages 81, (2013).
- PIOLA, A.R., MÖLLER, O.O., GUERRERO, R.A., CAMPOS, E.J.C. Variability of the subtropical shelf front off eastern South America: Winter 2003 and summer 2004. *Cont. Shelf Res.*, 28(13):1639-1648. (2008).
- PRITCHARD, D. W. *Estuarine hydrography*. Adv. Geophys. New York: Academic Press, v.1. p.243-280. (1952).
- POTTER, R. O., DE CARVALHO, A. P., FLORES, C. A., & BOGNOLA, I., Solos do Estado de Santa Catarina. *Boletim de Pesquisa E Desenvolvimento*, 46, 721. (2010).
- ROSÁRIO, RENAN & BORBA, THAÍS & SANTOS, ARTHUR & ROLLNIC, MARCELO. Variability of Salinity in Pará River Estuary: 2D Analysis with Flexible Mesh Model. (2016).
- SANTOS, E. C. P. DOS, COSENZA, C. A. N., & AMORIM, J. C. C. Hybrid sediment

transport model for the "linguado" channel, state of Santa Catarina, Brazil. *Independent Journal of Management & Production*, 8(4), 1210. (2017).

SELUCHI, Marcelo; BEU, Cássia; ANDRADE, Kelen M.. Características das Frentes Frias Causadoras de Chuvas Intensas no Leste de Santa Catarina. *Rev. bras. meteorol.*, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 25-37, Mar. (2017).

SCHETTINI, C. A., & CARVALHO, J. L., Caracterização Hidrodinâmica Do Estuário Do Rio Cubatão, Joinville. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, 3(1), 87. (1999).

SILVA, L. C.; BORTOLUZZI, C. A. Texto explicativo para o mapa geológico do Estado de Santa Catarina. Escala 1: 500.000. Florianópolis: 11º Distrito do DNPM, 216 p., (1987).

SOUZA, M.P.G.: Simulação da Dispersão de Óleo na Baía do Espírito Santo Usando o Modelo Numérico MOHID-2D. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória (2010).

STOWA, A., Good Modelling practice handbook. STOWA report 99-05, Dutch dept. of Public Works, Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment report 99.036. (1999).

SUTHERLAND, J., WALTRA, D.J.R., CHESTER, T.J., VAN RIJN, L.C., SOUTHGATE, H.N., Evaluation of coastal area modelling systems at an estuary mouth. *Coastal Engineering* 51 (2), 119–142. (2004).

THOMPSON, R. O. R. Y. Low-pass filters to suppress iner-tial and tidal frequencies. *Journal of Physical Oceanography* 13, 1077-1083. (1983).

TOBÓN, C. A. P., Metodologia para la validación de modelos hidrodinámicos utilizando amplia información de campo: aplicación a la Bahía Meldrof em La Costa Del Mar Del Norte Alemán. Faculdade Nacional de Mina, Universidad Nacional de Colômbia. (2002).

TRUCCOLO, E. C. & SCHETTINI, C. A. F. Marés astronômicas na baía da Babitonga, SC. *Notas Técnicas Facimar*, 3: 57- 66. (1999).

TRUCCOLO, E. C., FRANCO, D. Characterization and Prediction of the Meteorological Tides at São Francisco do Sul, SC. *Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Rio de Janeiro, 2752-2757. (2000).

VELLOZO, T.G. E ALVES, A.R. - Características gerais do fenômeno da maré no Brasil. *Anais Hidrográficos da Diretoria de Hidrografia e Navegação*, Tomo LXI, (2004).

VALLE-LEVINSON, A. Definition and classification of estuaries. In: VALLELEVINSON, A. Ed(s). *Contemporary Issues in Estuarine Physics*. 1.ed. New York: Cambridge University Press. 415 p. (2010).

VANZ, ARGEU, et al. "Efeito de variáveis meteorológicas sobre o comportamento do nível do mar na costa catarinense, brasil." VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa. (2015).

VERBOOM, G.K., RONDE, J.G. DE, AND DIJK, R.P. VAN,. A fine grid tidal flow and storm surge model of the North Sea, *Continental Shelf Research*, Vol. 12, No. 2/3, pp. 213- 233. (1992).

VIEIRA, CELSO VÔOS, ET AL. Caracterização morfosedimentar e setorização do complexo estuarino da Baía da Babitonga/SC. Boletim Paranaense de Geociências, 62. (2008).

ZHANG, Y., BAPTISTA, A. M., & MYERS, E. P., A cross-scale model for 3D baroclinic circulation in estuary-plume-shelf systems: I. Formulation and skill assessment. Continental Shelf Research, 24(18), 2187–2214. (2004).

## APÊNDICE

Apêndice 1. Constituintes harmônicas dos dados extraídos dos marégrafos da Ilha da Paz e do Iate Clube de Joinville, através da biblioteca T Tide (Pawlowicz, 2002) do software Matlab®.

Marégrafo da Ilha da Paz						
Lat. -26°10'35.6" Lon. -48°29'08.0"						
Período dos dados analisados = 492 (dias)						
Início dos dados: 26/08/2017						
Constituinte	Frequência	Amplitude (cm)	Erro Amp. +/-	Fase (graus)	Erro Fase +/-	snr
*SA	0.000114	5.2069	0.453	99.03	5.1	130.00
*SSA	0.000228	2.9794	0.459	176.39	9.39	42.00
*MSM	0.00131	1.9212	0.521	247.78	13.43	14.00
MM	0.001512	0.4052	0.414	213.48	68.68	0.96
MSF	0.002822	0.3811	0.416	262.11	69.63	0.84
*MF	0.00305	1.145	0.436	251.12	23.75	6.90
ALP1	0.034397	0.2518	0.43	181.53	120.77	0.34
2Q1	0.035706	0.3339	0.522	33.45	91.49	0.41
SIG1	0.035909	0.5178	0.52	34.39	60.26	0.99
*Q1	0.037219	2.793	0.571	47.83	11.18	24.00
*RHO1	0.037421	0.5796	0.515	59.61	50.95	1.30
*O1	0.038731	11.2123	0.524	71.42	3.39	460.00
TAU1	0.038959	0.0696	0.309	235.06	222.69	0.05
BET1	0.04004	0.0581	0.377	103.07	232.34	0.02
*NO1	0.040269	1.4003	0.821	67.27	30.98	2.90
CHI1	0.040471	0.1638	0.34	70.38	155.45	0.23
PI1	0.041439	0.1826	0.405	200.48	147.28	0.20
*P1	0.041553	2.0958	0.441	123.71	13.46	23.00
*S1	0.041667	2.0709	0.696	328.51	16.81	8.90
*K1	0.041781	6.3246	0.587	131.74	4.85	120.00
PSI1	0.041895	0.1797	0.323	185.22	144.51	0.31
PHI1	0.042009	0.1838	0.375	169.88	134.44	0.24
THE1	0.043091	0.0463	0.383	21.42	220.26	0.02
J1	0.043293	0.0985	0.359	247.26	187.44	0.08
SO1	0.044603	0.1503	0.417	24.7	177.1	0.13
OO1	0.044831	0.2057	0.572	321.93	177.93	0.13
UPS1	0.046343	0.2389	0.559	256.82	172.59	0.18
OQ2	0.075975	0.457	0.536	129.99	62.64	0.73
EPS2	0.076177	0.4101	0.417	92.16	67.69	0.97
*2N2	0.077487	2.0077	0.5	134.38	14.48	16.00
*MU2	0.07769	2.2523	0.529	92.62	12.38	18.00
*N2	0.078999	5.6984	0.501	133.08	4.95	130.00
*NU2	0.079202	0.7517	0.451	153.66	35.13	2.80
GAM2	0.080309	0.1656	0.363	154.17	127	0.21
H1	0.080397	0.152	0.325	267.69	157.86	0.22
*M2	0.080511	33.4151	0.5	65.87	0.83	4500.00
H2	0.080626	0.0727	0.346	159.55	213.44	0.04

MKS2	0.08074	0.2871	0.417	64.01	112.89	0.47
LDA2	0.081821	0.38	0.467	343.71	77.97	0.66
*L2	0.082024	1.7188	0.405	12.77	14.84	18.00
*T2	0.083219	0.7212	0.483	71.18	39.43	2.20
*S2	0.083333	22.6754	0.431	68.02	1.24	2800.00
R2	0.083447	0.3104	0.366	76.84	61.04	0.72
*K2	0.083562	7.3178	0.601	56.88	4.88	150.00
*MSN2	0.084846	0.5013	0.454	231.67	52.09	1.20
ETA2	0.085074	0.487	0.585	80.05	84.2	0.69
*MO3	0.119242	1.4982	0.511	46.24	22.79	8.60
*M3	0.120767	6.3196	0.486	181.94	4.58	170.00
*SO3	0.122064	2.9914	0.575	103.16	11.46	27.00
*MK3	0.122292	3.672	0.51	71.05	8.2	52.00
*SK3	0.125114	1.9683	0.483	246.45	13.84	17.00
*MN4	0.159511	4.5798	0.487	93.28	5.82	88.00
*M4	0.161023	11.9173	0.467	135.6	2.09	650.00
*SN4	0.162333	1.0006	0.46	172.07	25.93	4.70
*MS4	0.163845	5.6323	0.46	217.78	5.18	150.00
*MK4	0.164073	1.6947	0.612	221.49	21.22	7.70
*S4	0.166667	0.7348	0.473	206.59	37.78	2.40
*SK4	0.166895	0.791	0.595	209.69	38.71	1.80
*2MK5	0.202804	0.4387	0.401	358.82	54.8	1.20
2SK5	0.208447	0.255	0.432	7.01	114.33	0.35
2MN6	0.240022	0.2195	0.352	44.79	124.13	0.39
M6	0.241534	0.2878	0.398	27.43	98.98	0.52
*2MS6	0.244356	0.8195	0.458	21.27	34.15	3.20
2MK6	0.244584	0.314	0.484	0.37	92.63	0.42
2SM6	0.247178	0.314	0.413	60.1	75.52	0.58
MSK6	0.247406	0.3532	0.542	50.39	86.4	0.42
3MK7	0.283315	0.2163	0.381	43.65	128.94	0.32
M8	0.322046	0.0366	0.299	235.89	237.71	0.02

---

Marégrafo do Iate Clube de Joinville

---

Lat. -26°17'30.6" Lon. -48°46'25.9"

Período dos dados analisados = 364

Início dos dados: 01/01/2014

Constituinte	Frequência	Amplitude (cm)	Erro Amp. +/-	Fase (graus)	Erro Fase +/-	snr
*M2	0.080511	42.5639	0.642	88.37	0.86	4400
*S2	0.083333	28.1847	0.624	91.18	1.17	2000
*M4	0.161023	21.7332	0.604	222.69	1.59	1300
*M3	0.120767	13.6404	0.598	227.14	2.6	520
*O1	0.038731	11.7388	0.712	79.3	3.61	270
*MN4	0.159511	9.4746	0.527	171.43	3.34	320
*MS4	0.163845	9.0416	0.599	319.2	3.88	230
*K2	0.083562	8.4468	0.743	78	5.94	130
*MO3	0.119242	7.896	0.721	12.45	5.68	120

*K1	0.041781	7.4728	0.623	145.27	5.38	140
*N2	0.078999	7.2927	0.595	155.68	4.54	150
*SO3	0.122064	4.9527	0.732	141.44	9.89	46
*MU2	0.07769	4.4069	0.543	124.99	8.36	66
*MK3	0.122292	4.3878	0.622	121.87	9	50
*L2	0.082024	3.5534	0.56	88.04	9.03	40
*Q1	0.037219	3.5423	0.707	66.29	12.65	25
*SK3	0.125114	3.4029	0.642	304.32	11.31	28
*MSF	0.002822	3.2907	0.711	122.52	11.15	21
*SSA	0.000228	2.7522	0.605	94.14	13	21
*MSM	0.00131	2.7376	0.583	148.73	13.46	22
*2N2	0.077487	2.4066	0.599	132.82	14.09	16
*MK4	0.164073	2.3957	0.788	330.2	19.48	9.3
*P1	0.041553	2.2358	0.61	140.39	15.93	13
*MF	0.00305	1.8389	0.589	274.28	19.25	9.8
*SN4	0.162333	1.7616	0.551	291.45	17.42	10
*M6	0.241534	1.5281	0.562	267.8	19.34	7.4
*MKS2	0.08074	1.1511	0.75	148.7	40.87	2.4
*S4	0.166667	1.1028	0.657	235.02	30.88	2.8
*NU2	0.079202	1.0206	0.516	177.12	34.72	3.9
*LDA2	0.081821	0.9681	0.624	22.29	38.97	2.4
*M8	0.322046	0.9642	0.492	91.12	33.28	3.8
*THE1	0.043091	0.8754	0.717	0.08	40.5	1.5
*MM	0.001512	0.8362	0.648	70.6	38.93	1.7
*2MK5	0.202804	0.8295	0.695	150.04	44.57	1.4
*ETA2	0.085074	0.821	0.733	59.01	68.95	1.3
*2MN6	0.240022	0.7775	0.512	185.66	37.01	2.3
*2MS6	0.244356	0.584	0.553	287.98	59.15	1.1
2Q1	0.035706	0.5587	0.633	16.11	74.08	0.78
*MSN2	0.084846	0.5485	0.49	231.4	63.46	1.3
NO1	0.040269	0.5292	0.638	343.32	71.7	0.69
BET1	0.04004	0.5275	0.664	5.17	84.86	0.63
SK4	0.166895	0.4432	0.616	297.27	112.17	0.52
EPS2	0.076177	0.443	0.524	102.83	78.6	0.71
OQ2	0.075975	0.3677	0.465	134.23	95.4	0.63
2SK5	0.208447	0.3653	0.541	221.43	107.37	0.46
MSK6	0.247406	0.3495	0.633	53.1	119.14	0.31
UPS1	0.046343	0.3399	0.856	245.54	170.37	0.16
3MK7	0.283315	0.3303	0.514	286.01	106.25	0.41
2SM6	0.247178	0.2969	0.465	215.85	113.03	0.41
SO1	0.044603	0.2953	0.641	163.01	148.02	0.21
2MK6	0.244584	0.2625	0.521	348.08	139.16	0.25
OO1	0.044831	0.2583	0.759	283.37	172.87	0.12
J1	0.043293	0.222	0.51	203.52	160.59	0.19
RHO1	0.037421	0.1951	0.554	142.81	161.7	0.12
SIG1	0.035909	0.1733	0.578	271.04	195.85	0.09
CHI1	0.040471	0.1201	0.56	98.58	235.61	0.046
PHI1	0.042009	0.0749	0.411	29.16	235	0.033
TAU1	0.038959	0.0649	0.372	338.47	194.21	0.03



ALP1	0.034397	0.0418	0.45	141.45	239.39	0.0086
------	----------	--------	------	--------	--------	--------

---